



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**PANU JÄÄMAA**  
**ANODISOINTILAITOKSEN LÄMMÖN TALTEENOTON KEHITTÄ-**  
**MINEN**

Diplomityö

Tarkastaja: professori Hannu Ahlstedt  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Luonnontieteiden tiedekunnan tiede-  
kuntaneuvoston kokouksessa  
4. maaliskuuta 2015

## TIIVISTELMÄ

**JÄÄMAA, PANU:** Anodisointilaitoksen lämmön talteenoton kehittäminen

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 59 sivua, 2 liitesivua

Kesäkuu 2015

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

Pääaine: Virtaustekniikka

Tarkastaja: professori Hannu Ahlstedt

**Avainsanat:** Anodisointilaitos, lämmöntalteenotto, ylijäämälämpö, lämpöpumppu, hukkalämpö

Anodisointilaitoksessa syntyy ylijäämälämpöä prosessialtaiden jäähtymisen sivutuotteena. Tätä lämpöä ei ole aiemmin hyödynnetty. Energian hinnan todennäköisesti kallistuessa tulevaisuudessa, nousee energian käytön vähentäminen entistä suurempaan rooliin. Tästä syystä anodisointilaitoksen hukkalämmön hyödyntämismahdollisuudet halutaan tutkia. Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää hukkalämmön käyttökelpoisuus ja onko sen hyödyntäminen toteutettavissa kannattavasti.

Työssä selvitettiin anodisointiprosessin kulkua, ja miksi siinä syntyy ylijäämälämpöä. Lisäksi määritettiin esimerkkilaitoksen tietoja käyttäen, kuinka suurella lämpöteholla lämpöä syntyy ja miten se vaihtelee ajallisesti. Talteen otettavalle lämmölle mietittiin käyttökohteita ja määritettiin niihin hyödynnettävissä oleva teho. Tilannetta tarkasteltiin myös taloudellisesti siinä tapauksessa, että osa primäärienergiasta korvataan talteenotetulla lämpöenergialla.

Prosessissa syntyvän lämmön määrän selvitys osoitti merkittävää tuotannosta riippuvaa ajallista vaihtelua. Lisäksi lämpöä syntyy todellisuudessa ennakoitua vähemmän. Tämä vaikeuttaa lämmön talteenottoa ja hyödyntämistä. Hyödynnettävä lämpö otettaisiin prosessin jäähtymisvedestä. Sen lämpötilataso on kuitenkin niin matala, että sen nostamiseen tarvittaisiin lämpöpumppu. Sopivan hyödyntämiskohteen löytäminen prosessista osoittautui myös vaikeaksi. Ongelmia aiheuttaa lisäksi hukkalämmön synnyn ja tarpeen mahdollinen eriaikaisuus. Lämpöä voitaisiin kuitenkin käyttää tiettyjen prosessialtaiden lämpimänä pitämiseen ja prosessiin lisättävän veden lämmittämiseen.

Edellä mainittujen hyödyntämisvaihtoehtojen pohjalta tehtiin lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuuslaskelma. Siitä huomattiin, että korvattavan lämmitysenergian ollessa riittävän kallista, hukkalämmön hyödyntäminen lämpöpumpun avulla voi olla hyvinkin kannattavaa. On olemassa kuitenkin useita määrittelyjen yhteydessä esille tulleita tekijöitä, jotka aiheuttavat epävarmuutta tuloksiin ja mahdollisesti vaikeuttavat hyödyntämistä käytännössä. Tästä syystä mitään täysin absoluuttista kannattavuudesta yleisellä tasolla ei voida sanoa. Tilanne pitää aina arvioida laitos- ja tapauskohtaisesti.

## ABSTRACT

**JÄÄMAA, PANU:** Development of Heat Recovery in Anodizing Plant  
Tampere University of Technology  
Master of Science Thesis, 59 pages, 2 Appendix pages  
June 2015  
Master's Degree Programme in Environmental and Energy Technology  
Major: Fluid Dynamics  
Examiner: Professor Hannu Ahlstedt

**Keywords:** Anodizing plant, heat recovery, excess heat, heat pump, waste heat

In anodizing plant excess heat is formed as a byproduct of cooling certain process tanks. This heat has not been utilized before. Likely energy will become more expensive in the future and therefore the reduction of energy usage will be more important than before. From this rises the will to investigate the potential of utilizing the waste heat of an anodizing plant. The objective of this thesis is to determine the feasibility of this heat and if the utilization can be profitable.

The anodizing process was explained and also why excess heat was formed. In addition it was determined how much heat power is formed and how it varies over time by using data from an existing plant which is used as an example in the thesis. Possible uses for the recovered heat were considered and the power needed for the utilization was determined. The economic aspect of a situation where part of the primary energy is replaced by recovered heating energy is also considered.

As the result of determining the amount of heat formed in the process it was noticed that it varies significantly over time because it is dependent on the production. In reality less heat is formed than was anticipated. This makes recovering and utilizing the heat more difficult. The recoverable heat would be taken from the process cooling water. The temperature level of the water is however so low that a heat pump would be needed in order to raise the temperature. Finding a suitable use for the heat proved to be difficult as well. Some problems are also caused by the fact that the formation and the need for waste heat may not be simultaneous. The recovered heat could be however used for keeping certain process tanks warm and heating some of the water added to the process.

Using the above-mentioned utilizing options a profitability calculation was made for an investment on a heat pump. It was noticed that if the replaceable heating energy costs enough the utilization of the waste heat can be very profitable. However there are many factors that have arisen during the process of making this thesis that cause uncertainty to the results and possibly make the utilization more difficult in reality. This is why nothing completely absolute can be said about the profitability in general. The situation has to always be evaluated regarding the specific plant and circumstances.

## ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Oy Galvatek Ab:lle. Työn tarkastajana on toiminut professori Hannu Ahlstedt.

Haluan kiittää erityisesti työn ohjaajana toiminutta insinööri Veli Ruismäkeä sekä Jarno Virtasta Oy Galvatek Ab:sta. Kiitokset myös muille Galvatekin henkilökunnan edustajille, jotka ovat auttaneet työn edistymisessä. Lisäksi kiitän Purso Oy:n ja Sapa Profily a.s:n edustajia heidän antamistaan tiedoista työtä varten.

Kiitän myös perhettäni tuesta opiskelun ja diplomityön tekemisen aikana.

Hollolassa, 13.5.2015

Panu Jäämaa

## SISÄLLYSLUETTELO

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.    | JOHDANTO .....   | 1  |
| 2.    | TEOREETTINEN TAUSTA .....  | 3  |
| 2.1   | Jäähdytysprosessi .....  | 3  |
| 2.1.1 | Kiertoprosessi.....  | 3  |
| 2.1.2 | Kylmäaineet .....  | 6  |
| 2.1.3 | Jäähdytysjärjestelmän kytkentäperiaatteet .....                          | 7  |
| 2.2   | Lämpöpumppu .....  | 9  |
| 2.2.1 | Erilaiset lämpöpumppuprosessit .....                                     | 9  |
| 2.2.2 | Lämpökerroin .....   | 10 |
| 2.2.3 | Lämpöpumpun pääkomponentit .....   | 11 |
| 3.    | YLIJÄÄMÄLÄMPÖ .....  | 13 |
| 3.1   | Ylijäämälämmön lähteet .....   | 13 |
| 3.2   | Ylijäämälämmön hyödyntämismahdollisuudet .....                           | 13 |
| 3.3   | Ylijäämälämmön hyödyntämistekniikat .....                                | 14 |
| 3.4   | Hyödyntämisen kannattavuus .....   | 15 |
| 4.    | ALUMIININ ANODISOINTILAITOS .....  | 17 |
| 4.1   | Prosessin kulku.....   | 18 |
| 4.1.1 | Esikäsittelyt .....  | 19 |
| 4.1.2 | Anodisointi .....  | 20 |
| 4.1.3 | Jälkikäsittelyt .....  | 21 |
| 4.2   | Jäähdytystä vaativat kohteet .....                                       | 21 |
| 4.3   | Lämmitystä vaativat kohteet .....  | 22 |
| 5.    | ESIMERKKILAITOKSEN JÄÄHDYTYS- JA LÄMMITYSJÄRJESTELMÄT .....              | 24 |
| 5.1   | Jäähdytysjärjestelmä.....  | 24 |
| 5.1.1 | Jäähdytysjärjestelmän toiminta .....                                     | 24 |
| 5.1.2 | Tekninen toteutus .....  | 26 |
| 5.1.3 | Jäähdytystehontarve .....  | 28 |
| 5.2   | Lämmitysjärjestelmä .....  | 29 |
| 5.2.1 | Lämmitystehontarve.....  | 29 |
| 5.2.2 | Lämpöenergiankulutus .....   | 30 |
| 6.    | ESIMERKKILAITOKSESSA SYNTYVÄ YLIJÄÄMÄLÄMPÖ .....                         | 33 |
| 6.1   | Prosessista saatavissa olevat tiedot .....                               | 34 |
| 6.2   | Prosessissa syntyvän lämpötehon määrittäminen .....                      | 34 |
| 7.    | YLIJÄÄMÄLÄMMÖN HYÖDYNTÄMISMAHDOLLISUUDET<br>ANODISOINTILAITOKSESSA ..... | 37 |
| 7.1   | Hyödyntämiskohteet.....  | 37 |
| 7.1.1 | Prosessiin lisättävän veden lämmittäminen .....                          | 38 |
| 7.1.2 | Huuhtelualtaiden lämmittäminen .....                                     | 39 |
| 7.1.3 | Prosessialtaiden lämmittäminen.....                                      | 40 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 7.1.4 | Tuotantotilan lämmittäminen .....           | 41 |
| 7.2   | Hyödyntämiseen tarvittava tekniikka .....   | 42 |
| 8.    | HYÖDYNTÄMISVAIHTOEHTOJEN VAATIMA TEHO ..... | 44 |
| 8.1   | Prosessialtaiden lämmittäminen .....        | 44 |
| 8.2   | Lisättävän veden lämmittäminen .....        | 46 |
| 9.    | TALOUDELLINEN TARKASTELU .....              | 48 |
| 9.1   | Investointilaskentamenetelmät .....         | 48 |
| 9.2   | Lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuus .....  | 49 |
| 10.   | YHTEENVETO .....                            | 55 |
|       | LÄHTEET .....                               | 58 |

LIITE A: LÄMPÖHÄVIÖT KYLVYN PINNALTA

LIITE B: LÄMPÖHÄVIÖT ALTAAN SEINÄMISTÄ

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

|                 |   |
|-----------------|---|
| COP             | engl. Coefficient of Performance, lämpökerroin  |
| ORC             | engl. Organic Rankine Cycle, voimalaitosprosessi, jossa kiertoaineena orgaaninen aine |
| $c$             | ominaislämpökapasiteetti  |
| $\varepsilon$   | todellisen prosessin kylmäkerroin   |
| $\varepsilon_c$ | ideaalisen eli Carnot-prosessin kylmäkerroin  |
| $I$             | virta   |
| $\dot{m}$       | massavirta  |
| $\eta_c$        | Carnot-hyvyyskerroin  |
| $P$             | sähköteho   |
| $Q$             | lämpöteho   |
| $Q_{in}$        | kylmäkoneen tai lämpöpumpun sitoma lämpöenergia                                       |
| $Q_{out}$       | kylmäkoneen tai lämpöpumpun luovuttama lämpöenergia                                   |
| $R$             | sähkövastus   |
| $T_H$           | lämpötila kylmäkoneen tai lämpöpumpun höyrystimessä                                   |
| $T_L$           | lämpötila kylmäkoneen tai lämpöpumpun lauhduttimessa                                  |
| $\Delta T$      | lämpötilaero  |
| $U$             | jännite   |
| $W_{in}$        | kompressoriin tehty ulkoinen työ  |

# 1. JOHDANTO

Energian hinta on noussut viime aikoina merkittävästi eikä hinnannousulle näy loppua ainakaan lähitulevaisuudessa. Tämän vuoksi teollisuudessa on jo jonkin aikaa panostettu energian käytön tehostamiseen ja vähentämiseen. Erityisesti tämä on koskenut energiantensiivistä teollisuutta, kuten paperi- ja metalliteollisuutta, jossa on ollut paljon potentiaalia tehostamiseen. Viime aikoina myös vähemmän energiaa käyttävässä teollisuudessa on alettu miettiä energiakysymyksiä yhä tarkemmin. Esimerkiksi teollisuuden hukkalämpöä on alettu hyödyntämään entistä tehokkaammin.

Tämän diplomityön tutkimuskohteena ovat alumiinin anodisointilaitoksen lämmön talteenottomahdollisuudet. Anodisointiprosessissa on jäähdytettäviä kohteita, joista siirretty lämpö hukataan tällä hetkellä ympäristöön. Samaan aikaan useita prosessin vaiheita joudutaan kuitenkin lämmittämään ulkopuolisella lämpöenergialla. Tästä on herännyt ajatus hukkalämmön hyödyntämisestä.

Tutkimuksen tilaaja suunnittelee ja toimittaa erilaisia pinta- ja vedenkäsittelylaitoksia ympäri maailman. Tilaajan tavoitteena on selvittää millaiset hyödyntämismahdollisuudet ovat olemassa alumiinin anodisointiprosessissa syntyvälle ylimääräiselle lämmölle. Jos ylimääräistä lämpöä pystyttäisiin käyttämään ulkopuolista energiantarvetta samalla vähentäen, voisi se olla kilpailuvaltti yritykselle tulevaisuudessa.

Tämä tutkimus pyrkii selvittämään, kuinka paljon hukkalämpöä syntyy ja minkälaisella tekniikalla lämmön hyödyntäminen on mahdollista kyseessä olevassa prosessissa. Lämmön suora hyödyntäminen on käytännössä lähes mahdotonta sen matalan lämpötilatason takia. Lämpötilatasoa on tämän takia nostettava käyttämällä lämpöpumpputekniikkaa. Työssä yritetään selvittää minkälaisia lämpötilatasoja tarvitaan lämmön hyödyntämiseksi ja millaisissa kohteissa sitä pystytään hyödyntämään. Ensisijaisesti lämpöä pyritään hyödyntämään itse prosessissa, jossa on useita lämmitettäviä kohteita. Toinen vaihtoehto on käyttää lämpöä prosessin ulkopuolisiin kohteisiin kuten kiinteistön lämmittämiseen. Ensimmäinen vaihtoehto on kuitenkin suositeltavampi, koska silloin hyödyntäminen ei riipu niin paljon ulkopuolista tekijöistä.

Työssä perehdytään myös markkinoilla olevaan lämpöpumpputekniikkaan ja pyritään selvittämään, minkälainen tekniikka sopii tutkimuksen kohteena olevaan prosessiin. Koska tavoitteena on prosessin ulkopuolisen energiantarpeen vähentäminen ja tätä kautta parempi taloudellinen kannattavuus, tarkastellaan tässä tutkimuksessa myös hukkalämmön mahdollisen hyödyntämisen kustannuksia ja säästöjä. Tämä tehdään arvioimal-



la investoinnin aiheuttamat kustannukset sekä siitä saatavat hyödyt ja muodostamalla investoinnin takaisinmaksuaika.

Tutkimuksen teoriaosuudessa kuvataan aluksi jäähdytysprosessia ja kylmäkonetta yleisesti sekä käydään läpi lämpöpumpun toimintaperiaate, sillä nämä liittyvät oleellisilta osin toisiinsa. Lisäksi käsitellään ylijäämälämmön hyödyntämistä yleisellä tasolla. Luvuissa 4 ja 5 esitellään alumiinin anodisointilaitoksen toimintaa ja prosesseja sekä kuvataan työssä esimerkkinä käytettävän todellisen laitoksen jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmiä. Luvussa 6 selvitetään kuinka paljon lämpöä todellisuudessa syntyy prosessin sivutuotteena ja miten paljon se vaihtelee ajallisesti. Tämän jälkeen luvussa 7 pohditaan hukkalämmön mahdollisia hyödyntämiskohteita ja -ratkaisuja ja valitaan niistä potentiaalisimmat. Näille kohteille määritetään tarvittava lämpöteho ja tehdään taloudellinen tarkastelu investoinnin kannattavuuden pohjalta. Tämän avulla selvitetään onko hukkalämmön hyödyntäminen ylipäättään järkevää ja kannattavaa.

## 2. TEOREETTINEN TAUSTA

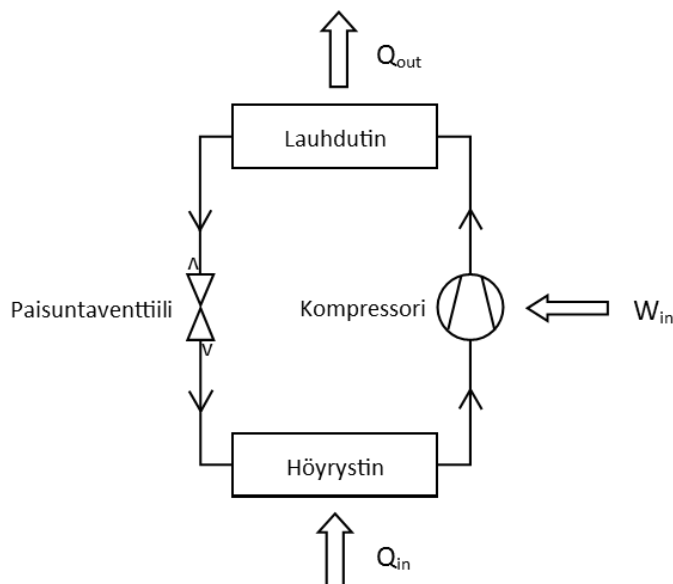
Tämän työn teoreettinen tausta koostuu pääasiassa jäähdytysprosessista ja lämpöpumpun toimintaperiaatteesta. Näissä molemmissa on kyse oikeastaan samasta asiasta, mutta hyödyntämisenäkökulma on nimensä mukaisesti päinvastainen. Näin ollen varsinainen jäähdytysprosessi kuvataan tässä luvussa tarkemmin, ja lämpöpumpun toimintaa käsitellään yleisemmällä tasolla.

### 2.1 Jäähdytysprosessi

Jäähdytykseen voidaan periaatteessa käyttää mitä tahansa prosessia, joka vaatii toteutukseen lämpöä. Prosessi voi olla avoin tai kiertoprosessi. Avoin prosessi ei palaa alkutilaansa eli se on luonteeltaan kertaprosessi. Kiertoprosessi puolestaan palaa jaksoittain alkutilaansa ollen luonteeltaan jatkuva. [1, s. 50]

#### 2.1.1 Kiertoprosessi

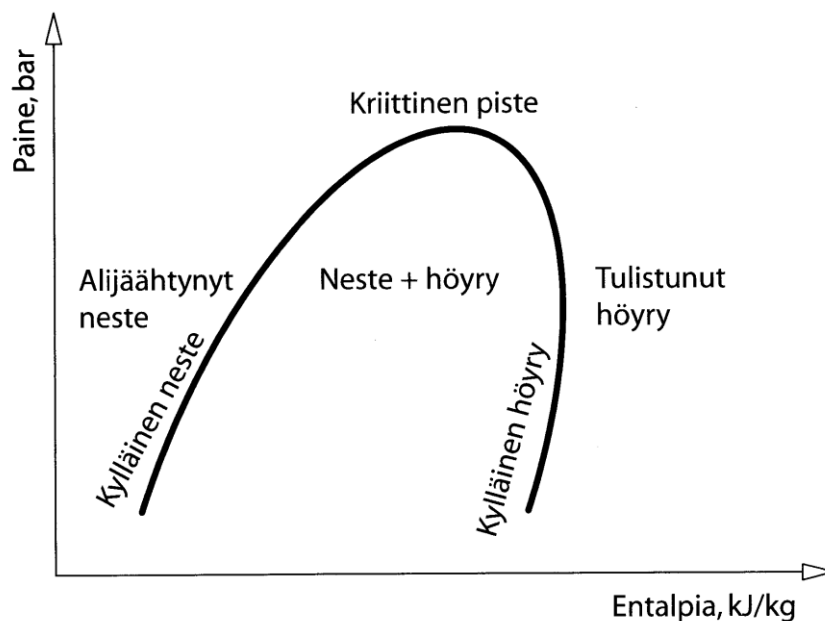
Yleisimmin jäähdyttäminen tai kylmän tekeminen perustuu kiertoprosessiin. Kylmälaitteistossa kiertävä kylmäaine höyrystyy ja lauhtuu vuorotellen siirtäen lämpöenergiaa matalammasta lämpötilasta korkeampaan. Kuvassa 2.1 on esitetty kylmälaitteiston periaate. Siinä näkyvät pääkomponentit ovat höyrystin, kompressori, lauhtutin ja paisunta-venttiili. [2, s. 10]



**Kuva 2.1.** Kylmälaitteiston periaate.

Kiertoprosessin voidaan ajatella alkavan höyrystimestä, jossa kylmäaine höyrystyy ympäristöä matalammassa lämpötilassa sitoen samalla lämpöä ympäristöstä. Matalapaineinen kylmäainehöyry imetään kompressoriin, joka puristaa sen korkeampaan paineeseen. Tällöin myös höyryn lämpötila nousee. Ympäristöä korkeammassa lämpötilassa oleva kylmäainehöyry nesteytyy eli lauhtuu lauhtuttimessa luovuttaen samalla lämpöä ympäristöönsä. Paisuntaventtiili alentaa kylmäaineen painetta, jolloin neste muuttuu höyryn ja nesteen seokseksi. Kylmäaineen lämpötila myös laskee. Tämän jälkeen seos menee höyrystimeen ja kiertoprosessi alkaa alusta. Teoreettisessa prosessissa lauhtuttimen luovuttama lämpö  $Q_{out}$  on sama kuin kylmäaineen höyrystimessä sitoma lämpö  $Q_{in}$  lisätynä kompressorin ottamalla työllä  $W_{in}$ . Todellisuudessa pieni osa lämmöstä siirtyy ympäristöön kompressorista ja putkistosta jo ennen lauhtutinta häviöinä. [2, s. 10]

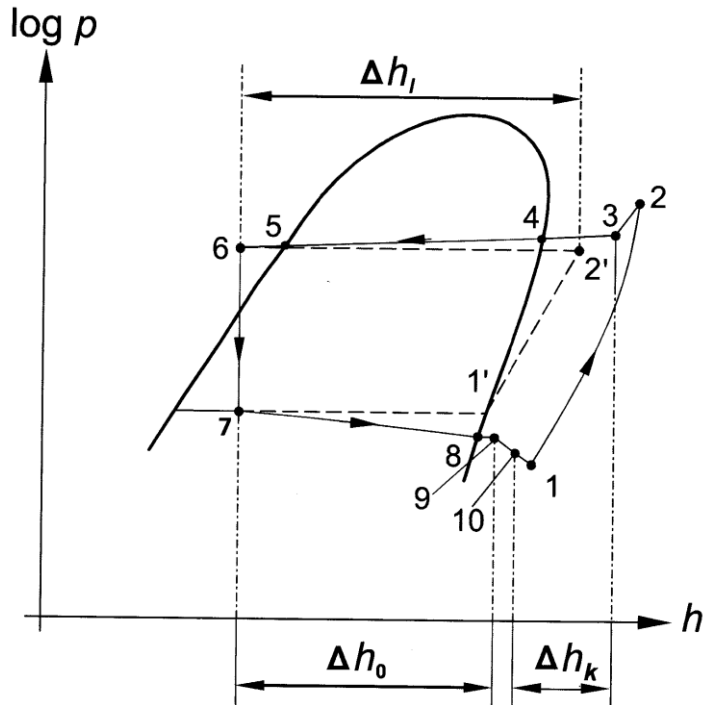
Kylmäteknikassa kiertoprosessin kuvaamiseen käytetään yleensä logaritmista paine-entalpia-tilapiirrosta, jonka periaate on esitetty kuvassa 2.2. Piirroksessa on pystyakselilla absoluuttinen paine logaritmisella asteikolla ja vaaka-akselilla kylmäaineen entalpia [1, s. 15]. Tilapiirros on kullekin kylmäaineelle ominainen.



**Kuva 2.2.** Kylmäaineen paine-entalpia-tilapiirros ja olomuodot [2, s. 11].

Tilapiirroksessa olevan rajakäyrän avulla piirroksesta voidaan nähdä kylmäaineen eri olomuodot. Vasemmalla olevalla käyrällä kylmäaine on kylläistä nestettä ja oikealla puolella olevalla käyrällä puolestaan kylläistä höyryä. Kylläisen nesteen rajakäyrän vasemmalla puolella neste on alijäähtynyttä. Kylläisen höyryn rajakäyrän oikealla puolella höyry on tulistunutta. Rajakäyrien välissä olevalla alueella kylmäaine on nesteen ja höyryn seos. Rajakäyrän huippuna on kriittinen piste, jonka yläpuolella höyry ei enää nesteydy. [2, s. 11]

Teoreettisen (katkoviivalla) ja todellisen kylmäprosessin erot on esitetty karrikoiduna kuvassa 2.3. Teoreettisessa prosessissa on välillä 1'-2' häviötön eli isentrooppinen puristus kompressorissa. Lauhduttimessa kylmäainehöyrystä poistuu tulistus välillä 2-4 ja se lauhtuu edelleen nesteeksi välillä 4-5 lämpöä luovuttaen. Tämän jälkeen neste alijäähtyy hieman vakioaineessa välillä 5-6. Pisteestä 6 suoraan alaspäin mentäessä nestettä kuristetaan paisuntaventtiilissä, jolloin sen paine laskee ja se muuttuu osittain höyryksi. Lopuksi mentäessä kohti pistettä 8 seos höyrystyy kokonaan kylläiseksi höyryksi sitoen samalla lämpöä. [1, s. 69]



**Kuva 2.3.** Teoreettisen ja todellisen kylmäprosessin erot karrikoiduna [1, s. 70].

Todellisessa kylmäprosessissa syntyy lukuisia häviöitä, joiden takia poiketaan teoreettisesta prosessista. Niitä ovat muun muassa lämpöhäviöt kompressorissa, jolloin puristus ei ole isentrooppinen (väli 1-2); kompressorin venttiilien painehäviöt (välit 10-1 ja 2-3); putkiston, lauhduttimen ja höyrystimen painehäviöt (välit 3-5 ja 7-10); höyryn lämpiäminen imukanavissa ja -venttiileissä (väli 10-1); höyryn jäähtyminen paineventtiileissä ja -kanavissa (väli 2-3) sekä kylläisen höyryn tulistuminen höyrystimessä ja imuputkessa (väli 8-10). [1, s. 70-71]

Jäähdytysprosessin hyötysuhteesta käytetään nimitystä kylmäkerroin  $\epsilon$ . Kylmäkerroin kertoo, kuinka paljon höyrystimessä pystytään sitomaan lämpöä  $Q_{in}$  kompressorin tehtyä työtä  $W_{in}$  kohden. Ideaalisessa vertailuprosessissa, Carnot-prosessissa, lämmön tuonti eli höyrystyminen ja lämmön poisto eli lauhtuminen tapahtuvat vakio-olämpötiloissa. Lämpötilojen  $T_H$  ja  $T_L$  välissä toimivan ideaalisen prosessin suurin mahdollinen kylmäkerroin on [1, s. 70]

$$\varepsilon_C = \frac{T_H}{T_L - T_H} = \frac{Q_{in}}{W_{in}} \quad (2.1)$$

missä  $T_H$  on höyrystymislämpötila [K] ja  $T_L$  on lauhtumislämpötila [K].

Todellisen eli häviöllisen prosessin kylmäkerroin  $\varepsilon$  voidaan ilmaista Carnot-kylmäkertoimen (kaava (2.1)) ja Carnot-hyvyyskertoimen  $\eta_c$  ( $<1$ ) avulla. Carnot-hyvyyskertoimeen on koottu kaikki häviöitä aiheuttavat tekijät yhteen, muun muassa termodynaaminen hyötysuhde ja kompressorin mekaaniset hyötysuhteet [1, s. 71].

$$\varepsilon = \eta_c \varepsilon_C \quad (2.2)$$

### 2.1.2 Kylmäaineet

Kylmäprosesseissa käytettäviä kylmäaineita on olemassa kymmenittäin. Kylmäaineen valintaan vaikuttavat lukuisat tekijät kuten kylmäkoneiston tekniset ratkaisut, haluttu teho ja lämpötilatasot sekä itse kylmäaineen erilaiset ominaisuudet. Suurin osa kylmäaineista on hiilivetyjä tai niiden johdannaisia, niin sanottuja halogeenihiilivetyjä. Muita käytettäviä aineita ovat muun muassa hiilidioksidi ja ammoniakki. [1, s. 106] Kylmäaineiden suuren lukumäärän vuoksi yksittäisten aineiden ominaisuuksia ei käsitellä tässä, vaan pitäydytään kylmäaineelta haluttujen yleisten ominaisuuksien lyhyessä kuvaamisessa.

Tärkeimmät kylmäaineelta vaadittavat ominaisuudet ovat luonteeltaan termodynaamisia, koska ne määräävät aineen käyttäytymisen kiertoprosessissa. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi suuri höyrystymislämpö, pieni viskositeetti ja hyvä lämmönjohtavuus. Luonnollisesti yksikään aine ei täytä kaikkia fysikaalisia vaatimuksia täysin, vaan valinnassa on tehtävä kompromissi käyttöolosuhteiden mukaan. [1, s. 107-108]

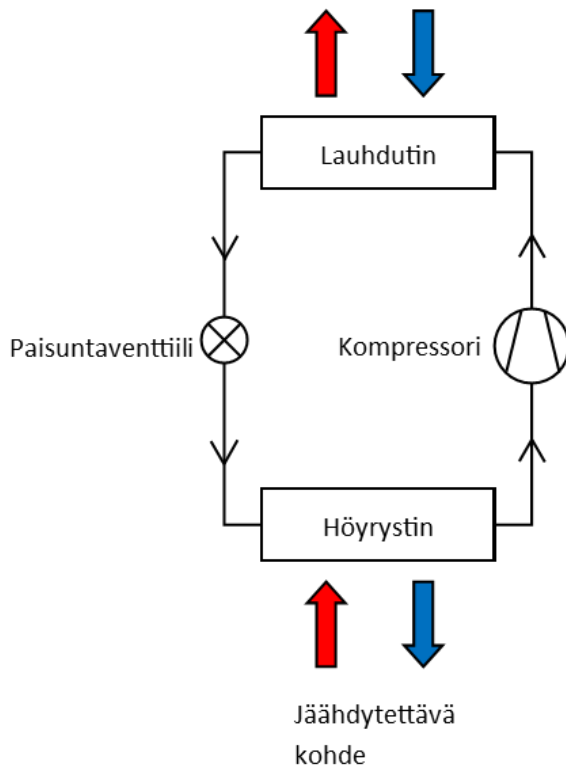
Kylmäaineelta vaaditaan myös tiettyjä kemiallisia ja fysiologisia ominaisuuksia. Kemiallisista tärkeimpinä ominaisuuksina ovat stabiilius ja reagoimattomuus muiden koneistossa käytettävien materiaalien kanssa. Fysiologiset ominaisuudet tarkoittavat vaikutuksia ihmiseen. Näistä tärkeimmät ovat myrkyttömyys ja vähäinen haitallisuus. [1, s. 108]

Kylmäaineiden ympäristövaikutukset ovat nousseet viimeisen parinkymmenen vuoden aikana tärkeään rooliin. Ilmakehälle aiheutuvien haittavaikutuksien takia monista niin sanotuista vanhoista kylmäaineista on jouduttu luopumaan ja kehittämään tilalle vähemmän haitallisia aineita. Ilmakehän kannalta eniten huomiota vaativat kylmäaineen ominaisuudet ovat otsonihaitallisuus ja kasvihuonevaikutuksen edistäminen. [1, s. 109]

### 2.1.3 Jäähdytysjärjestelmän kytkentäperiaatteet

KytKentäperiaatteella tarkoitetaan tapaa, jolla lämpöä siirretään jäähdytyskohteesta varsinaiseen kylmäkoneistoon ja siitä edelleen pois ympäristöön. Periaatteellisia tapoja jäähdytykseen on olemassa kaksi: suora ja välillinen jäähdytys. KytKentätavan valitseminen on aina tapauskohtainen riippuen jäähdytystarpeesta, halutuista lämpötilatasoista ja mahdollisesta lauhdelämmön hyödyntämisestä. [1, s. 281]

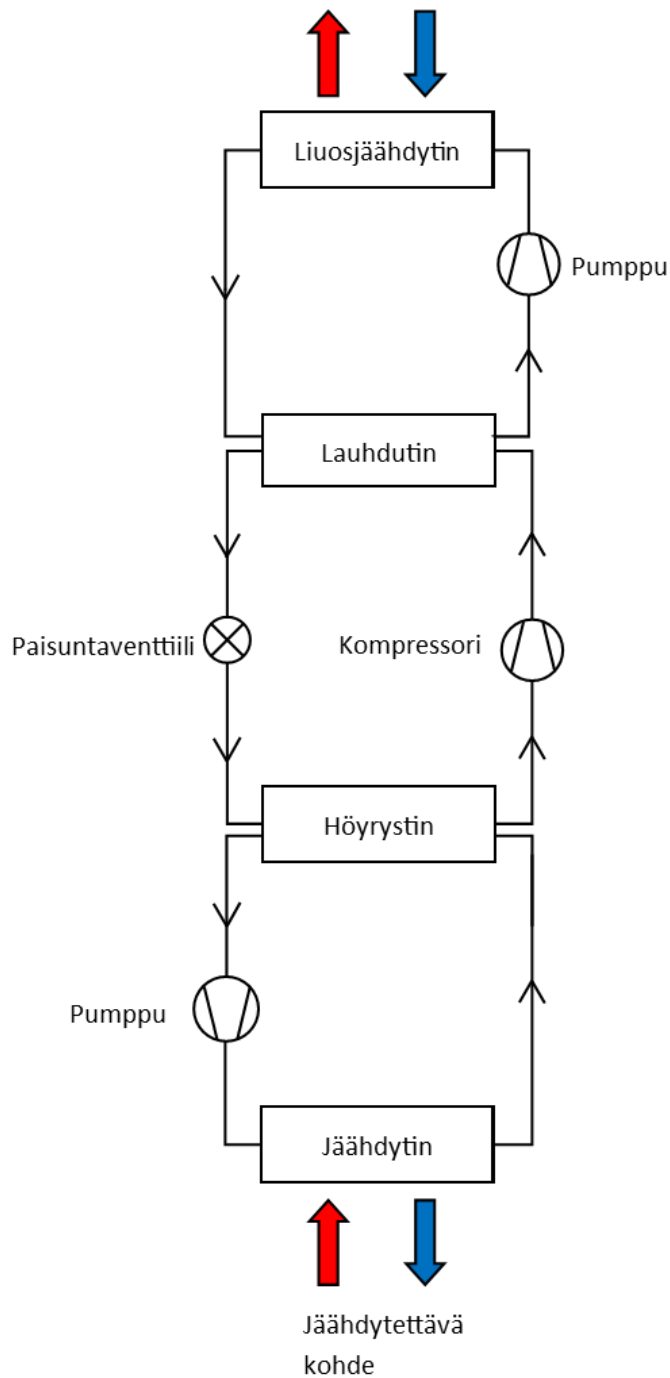
Kuvassa 2.4 on esitetty suora kytKentätapa, jossa kylmäkoneen höyrystin on suoraan jäähdytettävässä kohteessa, ja kylmäaine höyrystyy siellä joko kokonaan tai osittain. Tämän kytKentätavan etuina ovat yksinkertaisuus, edullisuus ja pienet putkistot. [1, s. 281-282] Suora järjestelmä ei kuitenkaan sovellu tilanteisiin, joissa jäähdytettävä kohde on kaukana itse kylmäkoneesta, koska vaadittava kylmäainetäytös muodostuisi kohtuuttoman suureksi. Lisäksi kylmäainevuotojen riski on suurempi kuin välillisessä järjestelmässä, koska kylmäaineputkistoja joudutaan rakentamaan myös itse kohteessa.



**Kuva 2.4.** Suora kytkentätapa.

Välillisessä järjestelmässä itse kylmäkoneiston kylmäaine ei kierrä jäähdytettävässä kohteessa. Kylmäkoneen ja jäähdytettävän kohteen välillä on toisiopiiri, jossa kiertävään lämmönsiirtonesteeseen lämpö siirtyy ensin, ja vasta tästä piiristä varsinaiseen kylmäaineeseen. [1, s. 283] Tämän lisäksi järjestelmässä voi olla toinenkin toisiopiiri, jonka avulla lämpö siirretään kylmäkoneen lauhduttimelta ympäristöön [3, s. 2]. Kuvassa 2.5 on esitetty tällaisen täysin välillisen järjestelmän periaate. Lämmönsiirtonesteinä voidaan sovelluskohteesta riippuen käyttää esimerkiksi epäorgaanisten suolien vesiliu-

oksia, orgaanisten aineiden vesiliuoksia tai puhtaita orgaanisia aineita [1, s. 285-286]. Jos jäähdytettävän prosessin lämpötilataso on niin korkea, että jäätymisvaaraa ei ole, voidaan väliaineena käyttää myös tavallista vettä.



**Kuva 2.5.** Välillinen eli epäsuora kytkentätapa.

Välillisellä järjestelmällä saavutetaan monia etuja. Ensinnäkin voidaan varmistaa, että mahdollisesti haitallinen kylmäaine ei pääse vuotamaan jäähdytettävään kohteeseen. Lisäksi kylmäainevuotojen riski on muutoinkin pienempi, koska koneikko voidaan valmistaa tehtaalla valmiiksi asti paremmin kontrolloiduissa olosuhteissa. Kylmäainetäytös myös pienenee ja se voidaan rajata vain konehuoneeseen, mikä parantaa turvallisuutta

[2, s. 184]. Muita etuja ovat prosessin hyvät säätöominaisuudet ja mahdollisuus varastoida "kylmää" käyttämällä puskurisäiliötä. Merkittävä energiaa säästävä etu varsinkin kylmän ilmaston alueella kuten Suomessa on mahdollisuus käyttää vapaajäähdytystä eli jäähdytystä kylmällä ulkoilmalla. Välillisen kytkennän haittoina puolestaan ovat ylimääräinen lämpötilaero höyrystimessä (huonontaa kylmäkerrointa) ja lauhduttimessa, lämmönsiirtonesteen pumppauskustannukset sekä suuremmat putkistot kuin varsinaiselle kylmäaineelle. [1, s. 283]

## 2.2 Lämpöpumppu

Lämpöpumpun toimintaperiaate on täysin sama kuin kylmäkoneenkin, mutta lämpöpumpun ensisijainen tehtävä on tuottaa lämpöä jäähdytyksen sijasta. Toiminta perustuu useimmiten käänteiseen Clausius-Rankine-kiertoprosessiin, jossa kylmäaine kiertää koneistossa höyrystyen ja lauhtuen vuorotellen ja samalla siirtäen lämpöä matalammas- ta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan (kuva 2.1). Lämpöpumpun suunnittelussa on vain lähdetty lämmön tuottamisen kannalta liikkeelle, jotta saadaan mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella halutun lämpötilaista lämpöenergiaa. Lämpöpumppu, kuten kylmäkonekin, vaatii siis toimiakseen ulkoista energiaa, joko mekaanista tai lämpöenergiaa.

Lämpöpumppua käytetään matalalämpötilaisen lämpöenergian hyödyntämiseen nostamalla sen lämpötilaa joitain kymmeniä asteita jääden kuitenkin yleensä alle sadan asteen loppulämpötilaan. Tarkemmat arvot riippuvat hyvin paljon sovellutuksesta. Asuinrakennusten lämmityksessä lämpöpumppuja käytetään yleensä matalan lämpötilan lämmitysjärjestelmien yhteydessä, kuten lattialämmityksessä ja ilmalämmityksessä.

Teollisuudessa lämpöpumppuja on käytetty pitkään, mutta käyttöä on rajoittanut niiden suhteellisen matalat lämpötilatasot. Nykyisin suosio on kasvamaan päin energian hinnan nousun ja tekniikan kehittymisen myötä. Teollisuudessa lämpöpumppuja käytetään paljon hukkalämmön hyödyntämiseen, mitä käsitellään enemmän luvussa 3. Lämpöpumpun käyttäminen on järkevää, jos sen avulla voidaan korvata ostoenergiaa, lämpöpumpun käyttöenergia on halvempaa kuin korvattava energia ja investoinnin takaisinmaksu-aika on tarpeeksi lyhyt [4].

### 2.2.1 Erilaiset lämpöpumppuprosessit

Lämpöpumpun toteuttamiseen on olemassa useita eri vaihtoehtoja. Lämpöpumppuprosesseille on kuitenkin yhteistä se, että lämpöpumppu hyödyntää viileää lämpöenergiaa nostamalla sen lämpötilaa ulkoisen työn avulla ja luovuttaa sen lämmitettävään kohteeseen alkulämpötilaa korkeammassa lämpötilassa. Toimintaperiaatteen mukaan lämpöpumput voidaan jakaa kahteen kategoriaan, avoimen ja suljetun kierron lämpöpumppuihin. [4]



Avoimiin lämpöpumppuprosesseihin lukeutuvat ejektori eli termokompressorin sekä mekaaniset höyryn komprimointilaitteet. Ejektori on periaatteessa lämpökäyttöinen kompressorin, jonka käyttöenergiana on sama höyry, jota puristetaan [1, s. 350]. Lämpötilan nousu saadaan aikaan sekoittamalla höyryyn korkeampipaineista höyryä [4]. Höyryn komprimointi on vastaava prosessi, mutta se toimii mekaanisella kompressorilla, joka nostaa kaasufaasissa olevan prosessiaineen painetta ja lämpötilaa [1, s. 351].

Suljettuja lämpöpumppuprosesseja ovat absorptiolämpöpumput ja kompressorilämpöpumput. Absorptiolämpöpumppuja on edelleen olemassa kahta tyyppiä: varsinainen absorptiolämpöpumppu ja lämpömuunnin [1, s. 352]. Lämpömuunnin jakaa käytettävissä olevan lämpövirran lähes ilman ulkoista energiaa kahteen osaan, joista toinen on lämpötilaltaan alempi ja toinen on korkeampi kuin lähtövirtaus. Absorptiolämpöpumppu puolestaan toimii kuumen lämpöenergian, useimmiten kuumen veden tai höyryn, avulla. [4] Absorptiolämpöpumpun käytön edellytyksenä on se, että käyttöenergiaksi on saatavilla edullista kuumaa lämpöenergiaa.

Mekaanisen kompressorilämpöpumpun toiminta ja rakenne ovat täysin vastaavat kuin perinteisen kiertoprosessia hyödyntävän kylmäkoneiston. Eroina ovat yleensä vain korkeammat lämpötilatasot. Myös lämpöpumppujen kiertoaineita kutsutaan yleisimmin kylmäaineiksi ja ne ovat pääosin samoja kuin jäähdytyssovelluksissa käytettävät. Lämpöpumppujen komponenttinaan (kompressorit, lämmönsiirtimet) eivät juurikaan eroa jäähdytyksessä käytetyistä. [1, s. 352]. Kompressorin käyttövoima tuotetaan yleensä sähkömoottorin avulla, jossain tapauksissa voidaan käyttää myös kaasumoottoria [4].

Mekaanisten kompressorilämpöpumppujen avulla pystytään hyödyntämään jopa alle 10 °C lämmönlähteitä vielä kohtuullisella lämpökertoimella. Mekaaniset lämpöpumput ovat olleet aiemmin on/off –tyyppisiä. Niiden käyttöä ovat kuitenkin rajoittaneet huonot säätöominaisuudet osakuormilla. Tämän tyyppisten lämpöpumppujen säädettävyyttä on mahdollista parantaa kytkemällä useampia pienitehoisia pumppuja rinnan ja käynnistämällä niitä tehontarpeen mukaisesti. Viime aikoina yleistynyt taajuusmuuttajakäyttö on mahdollistanut sähkömoottorin ja täten kompressorin portaattoman säädön. Tämän ansiosta myös lämpöpumpun säätöominaisuudet ovat huomattavasti parantuneet. Tämän lisäksi turbokompressorilla varustettuja lämpöpumppuja voidaan säätää säädettävillä johtosiivillä. [5]

### 2.2.2 Lämpökerroin

Lämpöpumpun tehokkuuden mittarina käytetään lämpökerrointa, josta käytetään yleisesti lyhennettä COP (engl. coefficient of performance). Se määritellään samaan tapaan kuin jäähdytysprosessin yhteydessä käytettävä kylmäkerroin. Lämpökerroin kertoo, mikä on lämpöpumpulla tuotetun lämpöenergian  $Q_{out}$  suhde lämpöpumpun käyttämiin tarvittavaan ulkoiseen työhön  $W_{in}$  [1, s. 349]:

$$COP = \frac{Q_{out}}{W_{in}} \quad (2.3)$$

Lämpökerroin voidaan määrittää myös ideaaliselle Carnot-lämpöpumpppuolosuhteille, joka toimii lämpötilojen  $T_H$  ja  $T_L$  välillä seuraavan yhtälön mukaisesti [2, s.11]:

$$COP = \frac{T_L}{T_L - T_H} \quad (2.4)$$

missä  $T_H$  on kiertoaineen höyrystymislämpötila [K] ja  $T_L$  on kiertoaineen lauhtumislämpötila [K].

Ideaalista lämpökerrointa ei voida koskaan saavuttaa, vaan todellisuudessa mekaanisten lämpöpumppujen lämpökerroin on luokkaa 65–75 % ideaalisesta. Teollisissa prosesseissa lämpökertoimet vaihtelevat voimakkaasti riippuen käytetystä lämpöpumpputyypistä sekä käyttöolosuhteista. Mekaanisilla kompressorilämpöpumpuilla COP-arvot ovat tyypillisesti välillä 2,5–7,5, absorptiolämpöpumpuilla 1,5–1,8, höyryn komprimointilaitteilla 3–30 ja termokompressoreilla välillä 1,5–5. [4]

### 2.2.3 Lämpöpumpun pääkomponentit

Lämpöpumpun pääkomponentit ovat samat kuin kylmäkoneenkin eli höyrystin, kompressori, lauhdutin ja paisuntaventtiili. Myös kylmäaine voidaan ajatella yhdeksi komponentiksi. Tässä yhteydessä tarkastellaan mekaanista kompressorilämpöpumppua, joka on lämpöpumpputyypeistä yleisin.

#### *Kompressori*

Kompressoreita on useita erityyppisiä ja ne voidaan jaotella monin eri tavoin. Rakenteensa puolesta ne jakautuvat kolmeen eri tyyppiin: avoimiin, hermeettisiin ja puolihhermeettisiin. Avoimeen kompressoriin käyttövoima siirretään kuoren läpi menevällä akselilla, jonka tiivistäminen saattaa aiheuttaa hankaluuksia. Hermeettinen kompressori on puolestaan täysin suljettu eli se sijaitsee umpeen hitsatun ja tiiviin kuoren sisällä. Umpinainen rakenne vaikeuttaa vikojen korjaamista huomattavasti, joten suurempitehoisissa kompressoreissa käytetään yleensä puolihhermeettistä rakennetta, joka on tarvittaessa purettavissa. [1, s. 147-149]

Toinen tapa jaotella kompressorit on toimintaperiaatteensa mukaan seuraavasti: mäntäkompressorit, ruuvikompressorit, kierukka- eli scroll-kompressorit, kiertomäntä- ja lamellikompressorit sekä turbokompressorit [1, s. 136-138]. Lämpöpumpuissa käytetään yleisesti näistä kaikkia tyyppisiä lukuun ottamatta kiertomäntä- ja lamellikompressoreita. Pienemmissä lämpöpumpuissa käytetään hermeettisiä mäntä- tai scroll-kompressoreita. Lämmitysteholtaan yli 100 kW pumppuissa rakenne on yleensä puolihhermeettinen mäntä- tai ruuvikompressori. [2, s. 225] Kaikkein suurimmissa lämpöpumpuissa käytetään turbokompressoria. Kompressorityypin käyttö vaihtelee kuitenkin hyvin paljon eri valmistajien välillä.

### ***Lämmönsiirtimet***

Lämpöpumpuissa on ainakin kaksi lämmönsiirrintä: höyrystin ja lauhdutin. Myös lämmönsiirtimet voidaan jaotella sekä toimintansa että rakenteensa perusteella. Toimintaperiaatteen mukaan jaottelu voidaan tehdä myötä-, vasta- ja ristivirtaperiaatteella toimiviin. Erilaisia rakenteita ovat muun muassa levy-, putki- ja koaksiaalilämmönsiirrin. Lämpöpumpuissa käytetään yleisimmin levy- tai moniputkityyppisiä lämmönsiirtimiä. [1, s. 352] Varsinkin levylämmönsiirtimiä käytetään paljon niiden pienen tilantarpeen sekä hyvän hinta-laatusuhteen vuoksi. [2, s. 225]

Lauhduttimen lisäksi lämpöpumpussa voi olla erikseen tulistuslämmönvaihdin. Kompressorilta tuleva kuuma ja tulistunut höyry johdetaan ensin tulistuksenpoistovaihtimeen. Tällöin pystytään ottamaan talteen korkeammassa lämpötilassa oleva kylmäaineen tulistuslämpö ja hyödyntämään se erikseen. Tulistuslämmön osuus lauhdutuslämmöstä on parhaimmillaan noin 20 %. [2, s. 231]

### ***Paisuntaventtiili***

Paisuntaventtiilin tehtävänä on säätää kylmäaineen ruiskutusta höyrystimeen. Pienemmissä lämpöpumpuissa käytetään yleensä perinteistä mekaanista termostaattista paisuntaventtiiliä, koska se on yksinkertainen ja täten myös edullinen. Mekaaninen paisuntaventtiili ei kuitenkaan välttämättä toimi luotettavasti osatehoilla. Tästä syystä teollisuusmittakaavan lämpöpumpuissa käytetään yleensä elektronista paisuntaventtiiliä. Ne pystyvät mukautumaan paremmin vaihteleviin käyttöolosuhteisiin. [2, s. 225-226]

### 3. YLIJÄÄMÄLÄMPÖ

Energian hinnan kallistuminen ja ympäristönäkökohtien merkityksen kasvaminen on johtanut siihen, että energian kulutuksen pienentämiseen kiinnitetään yhä enemmän huomiota. Yksi tapa tehostaa teollisuusprosessien energiataloutta on ylijäämälämmön hyödyntäminen.

Ylijäämälämmöllä tarkoitetaan teollisuusprosessin käyttämästä primäärienergiasta hyödyntämättä jäävää osaa, joka on usein matalalämpötilainen ja johdetaan hukkalämpönä ympäristöön [4]. Hukkalämmön hyödyntämisellä saatetaan kuitenkin saada aikaan merkittävät taloudelliset säästöt. Tämän lisäksi myös ympäristövaikutukset ovat usein myönteiset primäärienergian kulutuksen vähenemisen kautta.

#### 3.1 Ylijäämälämmön lähteet

Ylijäämälämmön lähteitä on teollisuudessa useita riippuen prosessin tyypistä. Yleisesti hyödyntämiskelpoisia lähteitä ovat prosessihöyryt ja -kaasut, jäte- ja jäähdytysvedet sekä koneellisen jäähdytyksen lauhdutuslämpö [5].

Jäähdytysprosessissa syntyy aina ylimääräistä lämpöä lauhdutuslämmön muodossa. Tämä lämpö on perinteisesti hukattu ympäristöön hyödyntämättä sitä mitenkään. Lauhdutuslämmön hyödyntäminen on kuitenkin yleistynyt viime aikoina. Hyödyntämistä vaikeuttaa kuitenkin lauhtumislämmön matala lämpötilataso. Usein ongelmaksi voi muodostua myös sopivan käyttökohteen löytyminen lämpöenergialle. Lisäksi talteenottojärjestelmän on oltava varmatoiminen eikä se saa missään tapauksessa vaarantaa itse kylmäprosessin toimintavarmuutta. [2, s. 211-212]

#### 3.2 Ylijäämälämmön hyödyntämismahdollisuudet

Teollisuusprosessien ylijäämälämmön hyödyntämismahdollisuudet riippuvat useista eri tekijöistä, koska ylijäämälämpöä esiintyy lukuisissa eri muodoissa ja eri ominaisuuksin. Nämä tekijät ovat useimmiten tapauskohtaisia, mutta muutamia yleisiäkin tekijöitä voidaan tunnistaa. Näistä termodynaamiselta kannalta tärkeimmät ovat käytettävissä oleva lämpötilataso ja potentiaalisesti saatavan lämpötehon suuruus. Käytännön kannalta taas tärkeää on väliaine, josta lämpöä on saatavissa. Itse väliaine, missä faasissa se on, sen kemialliset ominaisuudet ja puhtaus vaikuttavat olennaisesti lämmön talteenoton suunnitteluun ja teknisiin ratkaisuihin. Aineen ominaislämpökapasiteetti vaikuttaa siihen, kuinka tehokkaasti lämpö on siitä hyödynnettävissä. Esimerkiksi vedessä oleva ylijäämälämpö on helpommin hyödynnettävissä kuin ilmassa oleva. Jos kaikki edellä mainitut

tekijät eivät ole tarpeeksi suotuisia, saattaa ylijäämälämmön hyödyntäminen muuttua kannattamattomaksi, vaikka tilanne aluksi näyttäisikin lupaavalta. [6]

Talteenotetulle ylijäämälämmölle on yleensä löydettävissä lukuisia käyttökohteita. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi polttoaineen kuivattamiseen, raaka-aineiden tai prosessien esilämmittämiseen tai tehtaan kiinteistöjen lämmittämiseen. Ylijäämälämpöä pystytään joissain tapauksissa hyödyntämään myös jäähdytykseen absorptiokylmäkoneen avulla [6]. Jos ylijäämälämpöä ei pystytä hyödyntämään paikallisesti ja sitä on tarjolla runsaasti, voidaan lämpöä myös myydä esimerkiksi paikalliseen kaukolämpöverkkoon. Joskus voi olla jopa mahdollista ja kannattavaa tuottaa lämmön avulla sähköä pienessä mittakaavassa. [5]

Kannattavinta ylijäämälämmön hyödyntäminen on kuitenkin yleensä itse prosessissa. Kannattavuutta parantaa lämmön synnyn ja käytön samanaikaisuus. Se on tärkeää, sillä matalilla lämpötilatasoilla lämmön melko lyhytaikainenkin varastointi on hankalaa ja kannattamatonta. Toinen kannattavuutta parantava asia on lämmön synty- ja käyttöpaikan sijainti lähellä toisiaan. Tällöin saadaan suurin mahdollinen hyöty mahdollisimman pienillä kustannuksilla. Mitä kauemmaksi lämpöä joudutaan siirtämään, sitä enemmän menetetään energiaa siirtohäviöihin. Tämän lisäksi investoinnin suuruus voi kasvaa voimakkaasti käyttökustannusten ohella. [5]

Ylijäämälämmön hyödyntämismahdollisuudet riippuvat voimakkaasti itse prosessista. Tämän takia niiden arviointi on aina tehtävä yksilöllisesti ja tapauskohtaisesti. Vaikka hukkalämpöä syntyisikin merkittävä määrä, voi olla, että sitä ei pystytä kuitenkaan hyödyntämään kannattavasti. Usein käy myös niin, että ylijäämälämpöä on tarjolla eniten juuri silloin, kun sitä toisaalta tarvitaan kaikkein vähiten [4].

### 3.3 Ylijäämälämmön hyödyntämistekniikat

Ylijäämälämpöä voidaan joissain tapauksissa hyödyntää jopa sellaisenaan suoraan prosessissa. Hyödyntämiseen voi riittää pelkkä yksinkertainen kytkentämuutos. Toinen melko yksinkertainen tapa hyödyntää lämpöä on lämmönsiirtimen käyttäminen. Erilaisia teknisiä lämmönsiirrinratkaisuja on lukuisia riippuen käyttötarkoituksesta. Lämmönsiirtimen hyödyntäminen määritellään tässä yhteydessä ylijäämälämmön suoraksi hyödyntämiseksi.

Yleensä käytettävissä olevan ylijäämälämmön lämpötilataso on kuitenkin niin matala, että suora hyödyntäminen ei onnistu. Tällöin joudutaan käyttämään jotain tekniikkaa lämpötilatason nostamiseksi vaadittavalle tasolle. Käytettävissä olevia tekniikoita ovat esimerkiksi erilaiset lämpöpumppuratkaisut. [5]

Lämpöpumpun perusideana on ottaa lämpöenergiaa matalammasta lämpötilatasosta ja nostaa lämpötilataso korkeammalle, jotta lämpöä voidaan hyödyntää. Lämpöpumppu

vaatii toimiakseen ulkoista energiaa, useimmiten sähköä, mutta saatu lämpöenergia on aina suhteessa suurempi kuin kulutettu energia. Ylijäämälämmön hyödyntämisessä käytettäviä lämpöpumpputekniikoita ovat esimerkiksi mekaaniset lämpöpumput, jotka toimivat yleensä sähköllä; absorptiolämpöpumput, jotka toimivat kuumalla vedellä tai höyryllä; höyryn mekaaninen komprimointi, jota käytetään erityisesti petrokemian prosesseissa sekä termokompressori, joka toimii höyryllä. [5]

Jos ylijäämälämpö on lämpötilatasoltaan noin 100 °C ja sitä on saatavilla tarpeeksi, voidaan sitä käyttää hyväksi myös tuottamalla siitä sähköä ORC-laitoksen (engl. Organic Rankine Cycle) avulla. ORC-prosessi on idealtaan samankaltainen kuin perinteinen vesikiertoinen voimalaitosprosessi, mutta siinä kiertoaaineena on veden sijaan jokin orgaaninen aine, useimmiten hiilivety. Tämän ansiosta paine- ja lämpötilatasot ovat alhaisemmat kuin vesikiertoisissa prosesseissa muutamien muiden etujen lisäksi. [5]

### 3.4 Hyödyntämisen kannattavuus

Perusedellytys ylijäämälämmön hyödyntämiselle on yksinkertainen: sen avulla tuotetun energian tulee olla edullisempaa kuin korvattun energian. Mitä kalliimpaa korvattava energia on ja mitä pienemmällä investoinnilla se voidaan korvata, sitä kannattavampaa ylijäämälämmön hyödyntäminen on. Kannattavuutta parantaa myös pitkä käyttöaika ja mahdollisimman suuri korvattava teho. [6]

Lämpöpumppusovelluksissa kyse on lämmön ja lämpöpumpun käyttöenergian hintojen suhteesta. Toinen tärkeä edellytys on, että hukkalämpö itsessään on ilmaista tai ainakin hyvin edullista. Kustannuksia tulisi syntyä vain lämmön siirtämisestä, mihin vaikuttaa siirtoetäisyys voimakkaasti. [4] Lämpöpumpun käytön kannattavuutta parantaa huomattavasti myös se, jos sen tuottama jäähdytys pystytään hyödyntämään. Esimerkiksi prosesseissa käytettävä jäähdytysvesi voidaan jäähdyttää lämpöpumpun avulla ja siitä saatu lämpö käyttää hyödyksi. Näin saatava kokonaishyöty muodostuu paljon suuremmaksi kuin hyödynnettäessä pelkkä lämmitysvaikutus.

Myös kannattavuuden arviointi on hyvin tapauskohtaista, eikä voida antaa mitään yleistä ohjetta milloin ylijäämälämmön hyödyntäminen on taloudellisesti järkevää. Kannattavuuteen vaikuttavat muun muassa investointikustannukset eli laitteistojen hankinta- ja asennuskustannukset, käyttökustannukset kuten laitteiston energiankulutus sekä kunossapito- ja huoltokustannukset. [5] Investoinnin kannattavuutta voidaan suunnitteluvaiheessa arvioida esimerkiksi takaisinmaksuajan tai nykyarvomenetelmän avulla, mutta laskentaan tarvittavia suureita joudutaan usein arvioimaan melko karkeastikin. Tällaisia vaikeasti ennustettavissa olevia asioita voivat olla esimerkiksi energian hinnan kehitys tulevaisuudessa, käyttöajat ja huoltokustannukset [2, s. 211].

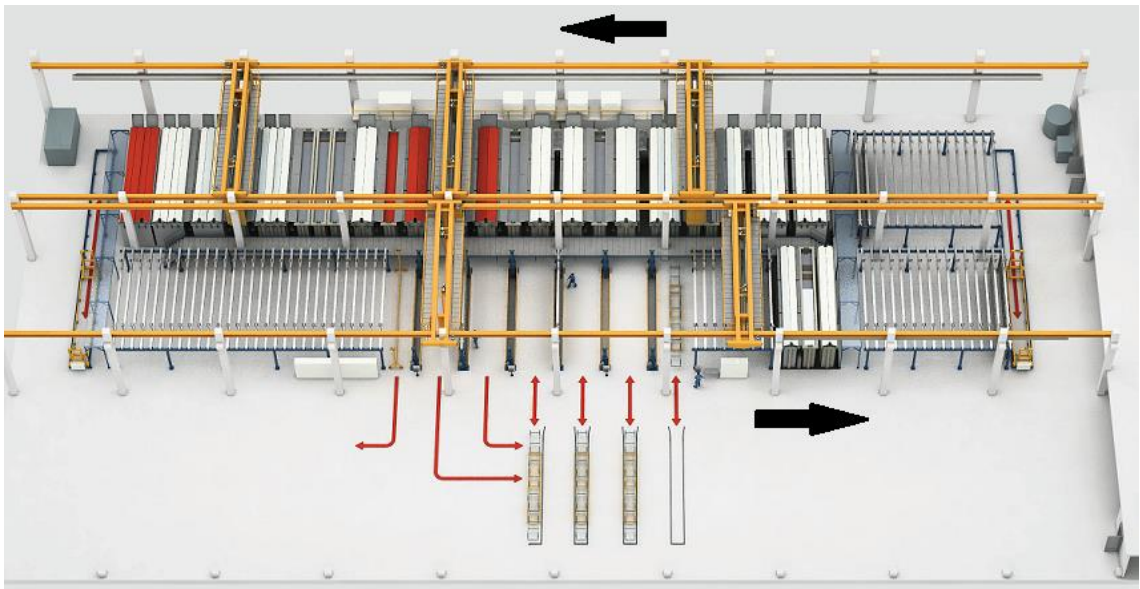
Kannattavuutta arvioitaessa tulee huomioida myös muut seikat kuin suoraan energian hintaan liittyvät. Tällaisia voivat olla vaikkapa tuotteen laatuun vaikuttavat tekijät.

Hukkalämpö voi olla mahdollista hyödyntää lämmittämällä sellaisia prosessin vaiheita, joita ei ole aiemmin lämmitetty. Jos tämä parantaa tuotteen laatua riittävästi ja lämmön talteenotto pystytään toteuttamaan suhteellisen pienin investoinnein, voi tämä olla kannattavaa, vaikka suoranaisia säästöjä energian käytön osalta ei saataisikaan. Toinen epäsuora tekijä voi olla primäärienergian tuottamiseen liittyvien tulevien investointien pieneminen hukkalämmön hyödyntämisen myötä. Lisäksi fossiilisia polttoaineita käyttävää primäärienergiantuotantoa korvattaessa hyödyt ympäristön kannalta erilaisten päästöjen vähenemisen myötä voivat olla merkittävät.

## 4. ALUMIININ ANODISOINTILAITOS

Alumiiniprofiileja valmistetaan kuumentamalla alumiinitanko tiettyyn lämpötilaan ja pursottamalla se halutun profiilin muotoisen muotin läpi. Pursotuksen jälkeen alumiinin pinta on varsin siisti, mutta se tulee kuitenkin pintakäsittellä jollakin tavalla hapettumisen estämiseksi. Suojaamaton pinta nimittäin hapettuu helposti ilmassa olevan hapen vaikutuksesta ja muuttuu ajan myötä himmeäksi ja laikulliseksi, lopulta jopa jauhe- maiseksi [7]. Tämän estämiseksi pintakäsittely voidaan tehdä joko jauhemaalaamalla tai anodisoimalla eli hapettamalla pinta kontrolloidusti jo tehtaalla valmiiksi.

Alumiinin anodisoinnissa alumiinin pintaan muodostetaan todella ohut oksidikerros johtamalla sähkövirta sen läpi. Kyse on siis elektrolyysistä. Syntynyt oksidikerros suojaa alumiinia luonnolliselta hapettumiselta. Alumiinioksidi on erittäin kovaa, sähköä eristävää ja lähes läpinäkyvää, ja se voidaan haluttaessa värjätä [8, s. 132]. Oksidikerros on myös hyvin kulutusta kestävä ja suojaa alumiinia erinomaisesti korroosiolta.



**Kuva 4.1.** Anodisointilaitoksen rakennekuva.

Varsinainen anodisointitapahtuma on melko pieni osa teollisen anodisointilaitoksen toimintaa, sillä suurin osa prosessin työvaiheista on erilaisia esi- ja jälkikäsittelyjä. Kuvassa 4.1 on esitetty anodisointilaitoksen yleiskuva. Alhaalla keskellä on las- taus/purkuasema, jossa alumiiniprofiilit asetellaan telineisiin. Kuvassa näkyvät kuljetti- met poimivat telineen kyytiin ja lähtevät kuljettamaan sitä prosessin eri vaiheisiin. Ne koostuvat erilaisista kemiallisista allaskylvyistä, joita ovat kuvassa näkyvät altaat. Lai- toksen kummassakin päässä ovat tankopuskurit sekä sivuttaissiirto, jolla vaihdetaan



linjaa. Alumiiniprofiilien käytyä läpi kaikki prosessin vaiheet eli kun ne ovat tehneet täyden kierroksen, ne palaavat takaisin lastaus/purkuasemalle, missä ne puretaan telineistä.

Suurimmassa osassa prosessialtaita on kannet. Niiden tarkoitus on estää haihtumia ja lämpöhäviöitä. Tämän lisäksi ne helpottavat altaiden kohdepoistojen järjestämistä. Kylvyissä käytetään haitallisia kemikaaleja, joten ilmanvaihdosta on huolehdittava. Altaiden päältä sekä kuljettimista imetään ilmaa, joka sitten puhdistetaan ennen ulospuhallusta.

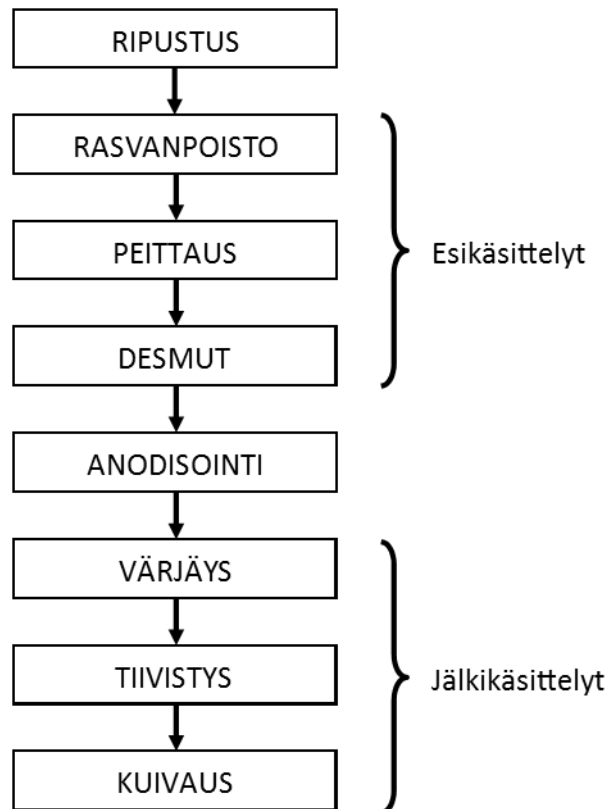
Lähes kaikkia prosessin kylpyjä myös sekoitetaan. Sekoituksen tarkoituksena on sekoittaa kylvyssä olevat kemikaalit tasaisesti koko altaaseen ja edistää kemiallisten reaktioiden tapahtumista. Anodisointikylvyssä sekoitus auttaa lisäksi jäähdyttämään alumiinia, joka lämpenee sähkövirran vaikutuksesta. Sekoitus toteutetaan ilmasekoituksena eli puhaltamalla kylpyihin paineilmaa.

## 4.1 Prosessin kulku

Alumiinin anodisointiprosessi koostuu periaatteessa kolmesta vaiheesta. Prosessin kulku ja sen sisältämät yleiset vaiheet on esitetty kuvassa 4.2. Kuvassa esitettyjen vaiheiden lisäksi prosessiin sisältyy lukuisia huuhteluita, joiden avulla kappaleita puhdistetaan ennen siirtymistä seuraavaan vaiheeseen. Niiden lukumäärä ja paikka vaihtelevat kuitenkin hieman laitospohtaisesti, joten niitä ei ole tässä eritelty.

Anodisointiprosessin ensimmäisenä vaiheena ovat erilaiset esikäsitteilyt, joissa alumiiniprofiilit puhdistetaan ja valmistellaan seuraavaan vaiheeseen, joka on varsinainen anodisointi. Viimeisenä vaiheena ovat puolestaan erilaiset jälkikäsitteilyt. Näiden vaiheiden lisäksi prosessiin kuuluvat vielä profiilien lastaus ja purku.

Käytännössä prosessi etenee siten, että ensin alumiiniprofiilit ripustetaan henkilövoimin telineeseen siten, että sähkövirta pääsee kulkemaan esteettömästi niiden läpi. Tämän jälkeen nosturi poimii telineen ja kuljettaa sen prosessin eri vaiheiden läpi tuoden sen lopulta takaisin lastaus-/purkupaikalle.



*Kuva 4.2. Anodisointiprosessin päävaiheet.*

#### 4.1.1 Esikäsittelyt

Esikäsittelyissä alumiini valmistellaan varsinaista anodisointia varten. Ensimmäisenä vaiheena alumiiniprofiilien lastauksen jälkeen on rasvanpoisto. Siinä alumiinin pinnassa oleva rasva ja muut epäpuhtaudet poistetaan lämpimässä ja lievästi emäksisessä kylvyssä. Tämän jälkeen on vuorossa peittaus. Se suoritetaan alkalisisessä kylvyssä, joka sisältää useimmiten natriumhydroksidia. Peittauksen tarkoituksena on poistaa alumiinin pintaan varastoinnin aikana muodostumaan päässyt luonnollinen oksidikalvo ja tasoittaa pienet naarmut ja pintaviat [8, s. 133]. Peittauksen yhteydessä alumiinin pintaan jää tumma nokikerros, jota kutsutaan nimellä smut. Se on erilaisia raskasmetalleja sisältävää sakkaa, joka on peräisin alumiinissa olevista seosaineista. Peittauksen jälkeen suoritetaan lämminhuuhtelu tavallisessa vedessä. Ennen anodisointia on vielä poistettava peittauksen yhteydessä muodostunut tumma nokikerros. Tämä tapahtuu happamassa noenpoistokylvyssä, jota usein kutsutaan desmut-kylvyksi. Happona käytetään typpi- tai rikkihappoa. Tämä vaihe myös aktivoi pinnan ennen anodisointia [9, s. 173].

### 4.1.2 Anodisointi

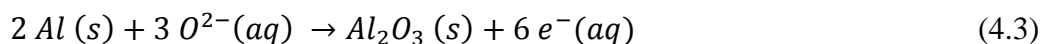
Alumiinin anodisoinnissa on kyse elektrolyysistä, joka on sähkövirran avulla aikaan saatu sähkökemiallinen reaktio. Anodisoitavat alumiinikappaleet kytketään anodiksi elektrolyyttiliuokseen, joka on yleensä rikkihapon ( $H_2SO_4$ ) vesiliuos. Esimerkkitapauksessa on kyseessä 20 % -rikkihappoliuos. Katodina prosessissa toimii toinen alumiinikappale. Anodin ja katodin välille kytketään tasavirta, joka saadaan aikaan tasasuuntaajilla vaihtovirrasta. Elektrolyyttiliuoksen läpi kulkeva sähkövirta saa aikaan veden hajoamisen vedyksi ja hapeksi seuraavan reaktioyhtälön mukaisesti:



Positiivisesti varautuneet vetyionit kulkeutuvat negatiivisesti varautuneelle katodille, jolla ne pelkistyvät vetykaasuksi:



Negatiivisesti varautuneet happi-ionit puolestaan hakeutuvat positiivisesti varautuneelle anodille eli anodisoitavalle alumiinikappaleelle. Siellä happi-ionit reagoivat alumiiniatomien kanssa synnyttäen alumiinioksidia  $Al_2O_3$ :



Myös elektrolyyttiliuoksessa oleva sulfaatti-ioni vaikuttaa anodisointikerroksen muodostumiseen. Anodisoinnissa alumiinikappaleen koko ei muutu, koska oksidikerros kasvaa sisäänpäin. Syntynyt oksidikerros on rakenteeltaan huokoinen ja paksuudeltaan noin 5–25  $\mu m$  riippuen käyttötarkoituksesta [8, s. 132]. Oksidikerroksen muodostumiseen ja sen ominaisuuksiin vaikuttavat useat tekijät kuten elektrolyytin väkevyys, lämpötila, jännite ja virrantiheys.

Elektrolyytin suuri väkevyys liuottaa jo syntynyttä oksidikalvoa voimakkaammin. Tämän seurauksena syntynyt oksidikerros on pehmeämpi ja huokoisempi. Toisaalta pieni väkevyys vaatii korkeamman jännitteen. Myös lämpötilan nostolla on samanlaisia vaikutuksia kuin väkevyydellä, joten alhainen lämpötila on eduksi. [9, s. 162]

Anodisoinnissa käytetään suurta virtaa (jopa 18 000 A) ja pientä jännitettä (noin 20 V). Käytettävän virran arvon määrää haluttu virrantiheys [ $A/dm^2$ ], johon vaikuttavat anodisointikerrokselta halutut ominaisuudet. Tämän lisäksi käytettävään virtaan vaikuttaa tietenkin anodisoitavien alumiinikappaleiden yhteispinta-ala. Virrantiheys vaihtelee tyypillisesti välillä 1–2,5  $A/dm^2$  [9, s. 162]. Suuremmalla virrantiheydellä oksidikerros kasvaa nopeammin.

Käytettävä jännite puolestaan vaihtelee prosessista riippuen välillä 14–22 V. Jännite vaikuttaa muun muassa siten, että syntyneiden huokosten lukumäärä oksidikerroksessa

pienenee jännitteen kasvaessa [9, s. 160]. Lisäksi jännite vaikuttaa virrantiheyteen, koska jännitteen kasvaessa myös virta kasvaa sähkövastuksen pysyessä samana, Ohmin lain mukaisesti:

$$U = RI \quad (4.4)$$

missä  $U$  on jännite [V],  $R$  on sähkövastus [ $V/A = \Omega$ ] ja  $I$  on sähkövirta [A]. Anodisoinnissa syntyvä oksidikerros lisää alumiinin sähköistä vastusta, jolloin syötettävää jännitettä joudutaan hieman suurentamaan prosessin edetessä halutun virrantiheyden ylläpitämiseksi. Myös käytettävä alumiiniseos vaikuttaa tarvittavaan jännitteeseen, jos tavoitteena on tietty virrantiheys [9, s. 163].

### 4.1.3 Jälkikäsittelyt

Varsinaisen anodisoinnin jälkeen alumiinikappaleet huuhdotaan ja suoritetaan tiivistys. Tiivistyksen tarkoituksena on sulkea anodisoinnissa syntyneet huokokset, jotta oksidikerroksesta tulee kestävämpi. Tiivistys voidaan tehdä useilla eri tavoilla. Yleisimmät ovat kuumatiivistys ja kylmätiivistys. Kuumatiivistys on yksinkertaisin menetelmä. Siinä alumiini kastetaan kuumaan, lähes kiehuvaan veteen. Kylmätiivistys puolestaan tehdään nikkeliä ja fluorideja sisältävässä liuoksessa. [8, s. 139] Tämän menetelmän etuna on huomattavasti pienempi energiankulutus, sillä kylvyn lämpötila on vain noin 30 °C, sekä lyhempi käsittelyaika. Jos tiivistysmenetelmänä käytetään kylmätiivistystä, joudutaan sen jälkeen kuitenkin vielä tekemään kuumahuuhtelu noin 90 °C vedessä ennen viimeistä vaihetta eli kuivausta. Kuivaaminen suoritetaan asettamalla alumiinikappaleet altaaseen, jossa niiden läpi puhalletaan lämmintä ilmaa puhaltimien avulla.

Anodisoinnin jälkeen oksidikerros voidaan haluttaessa myös värjätä, yleensä koristetarkoituksessa. Värjäystekniikoita on olemassa useita, ja yleensä ne perustuvat syntyneen oksidikerroksen huokosten kyllästämiseen väriaineella. Yleisin niistä on vaihtovirtavärjäys, josta käytetään myös nimitystä sähköväri. Siinä värjäytyminen tapahtuu erilaisilla metallisuoloilla riippuen halutusta värisävystä. Toinen tapa tehdä värjäys on yksinkertaisesti upottaa anodisoitu kappale väriliuokseen, joka sisältää yleensä orgaanista väriainetta, niin pitkäksi aikaa, että se värjäytyy. Kolmas tapa on värianodisointi, jossa oksidikerros värjätään anodisointiprosessin aikana. [9, s. 164-167]

## 4.2 Jäähdytystä vaativat kohteet

Alumiinin anodisointilaitoksessa syntyy ei-haluttua lämpöä lähinnä sähkövirran aikaansaamana. Tämän takia prosessin tiettyjä vaiheita joudutaan jäähdyttämään. Jäähdytettävistä kohteista ehdottomasti tärkein ja jäähdytysteholtaan suurin on varsinainen anodisointiallas. Samaan tapaan sähkövärin allasta joudutaan jäähdyttämään silloin, kun sitä käytetään. Anodisointikylpyjen lisäksi virtaa anodisointiin syöttäviä tasasuuntaajia joudutaan jäähdyttämään sisäisesti niissä syntyvien lämpöhäviöiden takia. Myös peit-

tauskylpyä joudutaan jäähdyttämään, jottei sen lämpötila kohoa liikaa lämpöä tuottavien kemiallisten reaktioiden seurauksena.

Anodisointikylpy on prosessin toimivuuden kannalta pidettävä 19 °C lämpötilassa yhden asteen tarkkuudella koko anodisointitapahtuman ajan. Tämä tarkoittaa, että kylpyä on jäähdytettävä aina, kun sähkövirta kulkee kylvyn läpi. Jäähdyttämiseen tarvittava teho vastaa suoraan tasasuuntaajalta tulevaa sähkötehoa, joka muuttuu alumiinissa esiintyvän sähköisen vastuksen takia kokonaan lämmöksi. Pieni osa sähkötehosta muuttuu kuitenkin jo tasasuuntaajassa ja virtakiskoissa häviöiden takia lämmöksi, joten kylvyn jäähdytysteho on hieman pienempi kuin sähköteho. Myös lämpöhäviöt altaasta pienentävät jäähdytystarvetta vähän. Sähköteho on suoraan verrannollinen käytettyyn jännitteeseen ja virtaan seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$P = UI \quad (4.5)$$

missä  $P$  on sähköteho [W].

Sähkövärikylvyn jäähdytystarve määräytyy samalla tavalla kuin anodisointikylvynkin. Siinä tosin virta voi olla myös sekoitus tasa- ja vaihtovirtaa. Lämpötilavaatimus ei ole niin tiukka kuin anodisoinnissa, vaan lämpötila saa vaihdella 18–25 °C välillä. Tämän lisäksi värjättävien tuotteiden osuus kokonaistuotannosta on hyvin pieni, joten jäähdytystarve on yleensä erittäin vähäinen tai sitä ei ole lainkaan. Myös kuormat ja virrantiheys ovat anodisointia pienemmät, joten jäähdytystehontarve suurimmillaankin on vain noin neljäsosan luokkaa saman linjan anodisointialtaaseen verrattuna.

Tasasuuntaajien jäähdyttämiseen tarvittava teho riippuu niiden koosta ja rakenteesta sekä niiden ottamasta tehosta, joten se on riippuvainen niiden valmistajasta. Jäähdytysteho vastaa tasasuuntaajassa syntyviä häviöitä ja on suuruusluokaltaan noin 10 % sen sähkötehosta.

### 4.3 Lämmitystä vaativat kohteet

Kaikkia anodisointiprosessin vaatimia esi- ja jälkikäsitteilykylpyjä joudutaan lämmittämään ainakin jossain määrin lukuun ottamatta suurinta osaa huuhteluista. Eniten lämmitystehoa vaatii prosessin loppupäässä oleva kuumahuuhtelu, jonka lämpötilataso on noin 90 °C. Muiden kylpyjen lämpötilat vaihtelevat välillä 25–70 °C. Esimerkkilaitoksessa käytetyt lämpötilat ovat tarkemmin eriteltynä seuraavassa luvussa.

Anodisointilaitoksessa joudutaan yleensä myös tuotantotilaa lämmittämään jossain määrin riippuen tietenkin siitä millaisessa ilmastossa laitos sijaitsee. Lämmityksen toteutus ja tarve riippuvat monesta tekijästä ja sen toteuttaminen kuuluu asiakkaalle, joten siihen ei tässä paneuduta tarkemmin.

Altaiden lämmitykseen vaadittavat tehot vaihtelevat kylpyjen lämpötilan ja tilavuuden sekä hieman käytettyjen kemikaalien mukaan. Eniten lämmitystehoa tarvitaan ylöslämmityksen aikana, kun linja on ollut esimerkiksi yön käyttämättä. Lämmitys toteutetaan pääsääntöisesti kylvyissä olevien putkipattereiden avulla. Lämmönsiirtoaineena käytetään yleensä kuumaa vettä tai höyryä.

Kylpyjen lämmityksen energiankulutuksen voidaan ajatella koostuvan kahdesta osasta, jotka ovat:

- ennen työaikaa tapahtuva kylpyjen lämpötilan nosto eli ylöslämmitys
- työaikainen kylpyjen lämpötilan ylläpito

Työaikainen lämmitysenergia koostuu erilaisten lämpöhäviöiden kompensoinnista. Nämä häviöt muodostuvat altaiden lämpöhäviöistä pinnan, seinämien ja pohjan kautta sekä tavarakeräimeen sitoutuneesta lämpöenergiasta. Myös ulkopuoliset sekoitus- ja suodatusputkistot aiheuttavat häviöitä. Toisaalta tavarakeräimeen sitoutunut lämpöenergia pienentää lämmityksen tarvetta, kun siirrytään kuumemmasta kylvystä viileämpään. Tämän lisäksi kierrätyspumpeissa osa liike-energiasta muuttuu kitkan kautta lämmöksi vähentäen lämmitystarvetta hieman. [10, s. 12]

Selvästi suurin osa lämpöhäviöistä tapahtuu pinnan kautta konvektiolla, säteilemällä ja haihtumisen seurauksena [10, s. 12]. Lämpöhäviöitä lisäävät tehokkaat kohdepoistot altaista, mutta toisaalta sitä vähentävät altaiden kannet. Häviöitä tapahtuu jonkin verran myös anodisoitavien kappaleiden mukana siirtyvien nestemäärien mukana. Niiden mukana siirtyvä lämpöenergia on kuitenkin hyvin vähäistä, ja ne aiheuttavat enemmänkin ongelmia itse prosessissa, kun väärää kemikaalia voi siirtyä toiseen osaprosessiin. Tätä pyritään vähentämään ripustamalla anodisoitavat kappaleet siten, että ne eivät kerää nestettä sekä valuttamalla niitä kylvystä noston jälkeen ennen siirtoa seuraavaan vaiheeseen.

Lämpöhäviöiden tarkempaa määrittystä ja niiden laskentaa on käsitelty erittäin kattavasti Lasse Satkan diplomityössä *Energiakustannukset galvaanisessa pintakäsittelylaitoksessa* [10]. Tästä syystä yksityiskohtaisia yhtälöitä häviöiden laskemiseksi ei tässä esitetä. Lisäksi lämpöhäviöiden määrittämiseen on olemassa graafisia kuvaajia, joista voidaan nopeasti lukea häviöt riittävällä tarkkuudella.

## 5. ESIMERKKILAITOKSEN JÄÄHDYTYS- JA LÄMMITYSJÄRJESTELMÄT

Tässä työssä käytetään esimerkklaitoksena Oy Galvatek Ab:n toimittamaa anodisointilaitosta, joka sijaitsee Suomessa. Yritys valmistaa tuotantolaitoksellaan alumiiniprofiileja, joiden pintakäsittelyyn anodisointilaitosta käytetään. Kyseinen laitos on ollut käytössä vuoden 2012 alusta lähtien.

Edellisessä luvussa lyhyesti kuvattuja yleisiä anodisointilaitoksen jäähdytys- ja lämmitystarpeita käsitellään tässä luvussa tarkemmin keskittyen esimerkklaitokseen ja siitä saatavissa oleviin mitoitus- ja käyttötietoihin. Näiden tietojen avulla kuvaillaan käytössä olevat jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmät sekä määritetään niiden vaatimat tehot.

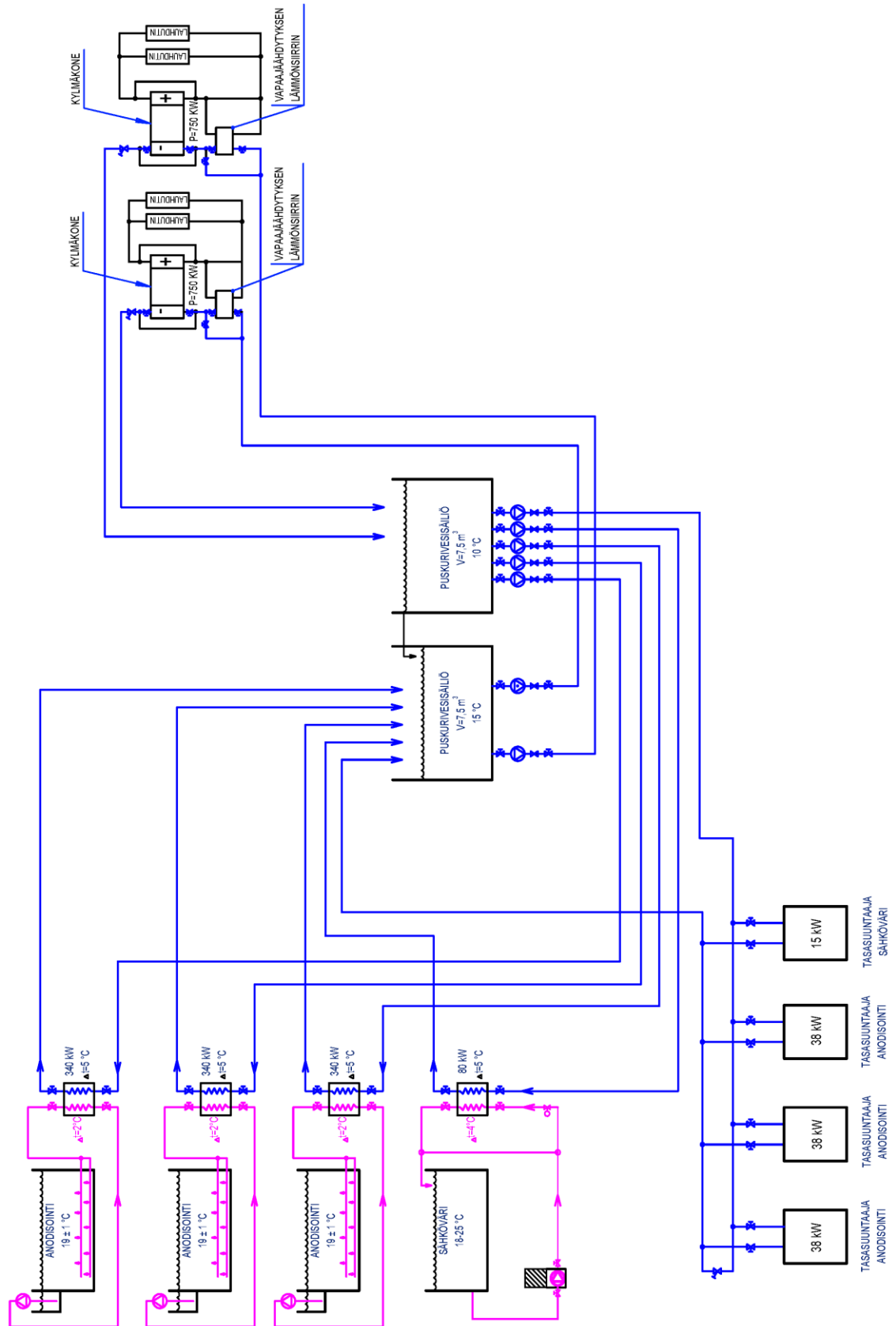
### 5.1 Jäähdytysjärjestelmä

Tarkasteltavan laitoksen jäähdytysjärjestelmä perustuu viileän jäähdytysveden käyttöön. Jäähdytysvesi kiertää prosessin jäähdytystä vaativissa kohteissa vastaanottaen lämpöä niistä. Veden jäähdyttäminen tapahtuu kahden vedenjäähdytyskoneen avulla. Lauhdutislämpö siirretään erilliseen liuospiiriin, josta lämpö edelleen siirretään ulkoilmaan. Kyseessä on siis välillinen jäähdytysjärjestelmä sekä höyrystymis- että lauhtumispuolella. Ulkolämpötilan ollessa riittävän matala vedenjäähdytyskoneiden sijaan käytetään jäähdytysveden viilentämiseen vapaajäähdytystä eli jäähdytystä viileällä ulkoilmalla.

Peittauskylvyn jäähdytys on esimerkklaitoksessa järjestetty muusta jäähdytysjärjestelmästä erillään olevan järjestelmän avulla. Jäähdytys tapahtuu viileän järviveden avulla.

#### 5.1.1 Jäähdytysjärjestelmän toiminta

Jäähdytysjärjestelmän toiminnan keskiössä on jäähdytysvesipiiri. Erillisiä jäähdytysvesikiertoja on yhteensä 5 kappaletta. Kolme niistä on varsinaisten anodisointialtaiden jäähdytykseen, yksi sähkövärialtaan jäähdytykseen ja yksi tasasuuntaajien sisäiseen jäähdytykseen. Jäähdytysvesikierrat ovat kytköksissä toisiinsa puskurisäiliöiden kautta. Sekä lämpimällä että kylmällä puolella on oma säiliönsä, joista vesikierrat lähtevät ja tulevat. Säiliöiden tarkoitus on tasata lämpötilan heilahteluita jäähdytystarpeen vaihdellessa ja toimia kylmän ja lämmön välivarastoina. Jäähdytysjärjestelmän virtauskaavio on esitetty kuvassa 5.1.



**Kuva 5.1.** Esimerkkilaitoksen jäähdytyskaavio.



Kuvassa 5.1 annetut tehot ovat jäähdytystehojen maksimiarvoja. Tämän lisäksi kuvassa on esitetty lämmönsiirtimissä tapahtuvat mitoitetut lämpötilan muutokset. Kuvasta nähdään myös rinnan kytketyt kylmäntuottopiirit, jotka koostuvat kylmäkoneista ja vapaajäähdytyksen lämmönsiirtimistä.

Pääasiallisen jäähdytyskohteen eli anodisointialtaiden jäähdytys tapahtuu kierrättämällä altaissa olevaa 20 % rikkihapon vesiliuosta lämmönsiirtimien läpi. Lämmönsiirtimissä lämpö siirtyy toisella puolella kiertävään jäähdytysveteen. Jäähdytynyt rikkihappoliuos palautetaan prosessialtaaseen ja lämmennyt jäähdytysvesi puolestaan puskurisäiliöön. Sähkövärikylyn jäähdytys on toteutettu täysin vastaavasti.

Anodisointikylpyjen jäähdytyksen lisäksi jäähdytysveden avulla jäähdytetään sähkön tasasuuntaajia kierrättämällä vettä niiden läpi. Kaikki kolme varsinaisen anodisoinnin sekä yksi sähkövärin tasasuuntaaja ovat kytkettyinä samaan jäähdytysvesikiertoon rinnan.

Varsinainen kylmäntuotto saadaan aikaan vedenjäähdytyskoneen tai vapaajäähdytyksen avulla. Lämpimässä puskurivesisäiliössä olevaa, lämpötilaltaan noin 15 °C prosessista palannutta vettä jäähdytetään 10 °C lämpötilaan ja palautetaan viileän veden puskurisäiliöön. Kylmäkoneen lauhtumislämpö siirtyy liuospiiriin, josta se edelleen siirtyy nestejäähdyttimien kautta ulkoilmaan.

Valinta kylmäkoneen käytön ja vapaajäähdytyksen välillä tehdään ulkolämpötilan perusteella. Lämpötilan oltua alle 4 °C yli kahden tunnin ajan, siirrytään käyttämään vapaajäähdytystä. Vapaajäähdytystä käyttämällä säästetään kylmäkoneen ottamaa sähkötehoa vastaava määrä sähköenergiaa. Tällöin jäähdytysjärjestelmä kuluttaa energiaa vain pumppujen ja puhaltimien vaatiman tehon verran. Vapaajäähdytyksessä vedenjäähdytyskoneella ei ole käyntilupaa. Liuoslauhdutuspiirin lämmönsiirtoneste ohjataan kylmäkoneen höyrystimen ohi ja edelleen vapaajäähdytyksen lämmönsiirtimeen. Lämmönsiirtoneste ottaa vastaan jäähdytysveden lämpöä lämmiten samalla itse ja jäähdyttää vettä. Liuospiiristä lämpö siirtyy nestejäähdyttimien kautta ulkoilmaan samalla tavalla kuin kylmäkonettakin käytettäessä.

### **5.1.2 Tekninen toteutus**

Jäähdytysjärjestelmä voidaan jakaa kahteen osaan: jäähdytysvesipiiriin ja varsinaiseen kylmäntuottopiiriin. Jäähdytysvesipiiriin luetaan myös lämmönsiirtimet. Kylmäntuottopiiriin puolestaan kuuluvat sarjassa olevat liuoslauhdutteen vedenjäähdytyskone ja vapaajäähdytyslämmönsiirrin.

### ***Jäähdytysvesipiiri***

Jäähdytysvesipiiriin kuuluu putkistojen ja pumppujen lisäksi puskurivesisäiliöt sekä viileällä että lämpimällä puolella. Säiliöt ovat avoimia ja tilavuudeltaan 7,5 m<sup>3</sup> kumpikin.

Jäähdytysvesipiiriin liittyvät myös lämmönsiirtimet, joiden avulla anodisointikylvyissä syntynyt lämpö siirretään jäähdytysveiteen. Esimerkkilaitoksessa anodisointialtaita on 3 kappaletta, joista jokaista jäähdytetään omalla jäähdytysvesikierrolla. Lämmönsiirtimet ovat vastavirtaperiaatteella toimivia levylämmönsiirtimiä, kukin lämmönsiirtoteholtaan 350 kW. Myös värikyllyn jäähdytys tapahtuu samalla periaatteella ja tekniikalla, mutta siinä oleva lämmönsiirrin on teholtaan vain 80 kW.

### ***Kylmäntuottoapiiri***

Esimerkkilaitoksessa on kaksi erillistä kylmäntuottoapiiriä, joissa kummassakin on sarjaan kytkettynä vapaajäähdytyspiiri sekä vedenjäähdytyskone. Valinta vapaajäähdytyksen ja kylmäkoneen käytön välillä tehdään siis ulkolämpötilan perusteella.

Vedenjäähdytyskoneita on kaksi ja ne ovat täysin identtisiä. Jäähdytysteholtaan ne ovat kumpikin 750 kW. Kylmäaineena toimii R134a. Koska kylmäkoneen kytkentä on tyypiltään välillinen sekä höyrystymis- että lauhtumispuolella, kylmäainetäytös pysyy kohdullisen pienenä ja rajoittuu ainoastaan konehuoneeseen. Kylmäkoneiden kompressorit ovat tyypiltään puolihiermeettisiä ruuvikompressoreja, ja niitä on kummassakin kaksi kappaletta. Kylmäkoneissa on moniputkihöyrystin ja moniputkilauhdutin.

Vedenjäähdytyskoneet ovat liuoslauhdutteisia. Liuoksena on 35 % etyleeniglykolin vesiliuos jäätyksen estämiseksi. Liuospiirin jäähdytys tapahtuu tuotantorakennuksen katolla olevien nestejäähdyttimien avulla käyttäen ulkoilmaa. Nestejäähdyttimiä on 2 kappaletta kummallekin kylmäntuottoapiirille, ja kaikissa jäähdyttimissä on 12 sähkömoottorilla toimivaa puhallinta, joiden avulla ilmaa imetään jäähdyttimien läpi.

Vapaajäähdytykseen käytetään samaa liuospiiriä kuin vedenjäähdytyskoneiden lauhtutukseenkin. Vapaajäähdytyksessä etyleeniglykoliliuos ohjataan kylmäkoneen sijaan lämmönsiirtimeen, jonka toisella puolella kiertää jäähdytysvesipiirin vesi. Lämmönsiirtimiä on yksi kummassakin kylmäntuottoapiirissä. Tyypiltään ne ovat vastavirtaperiaatteella toimivia levylämmönsiirtimiä ja lämmönsiirtoteholtaan kumpikin on 750 kW.

### 5.1.3 Jäähdytystehontarve

Anodisointialtaiden jäähdytystehontarve määräytyy edellisessä luvussa esitetyn sähkötehon laskukaavan (4.5) mukaisesti, riippuen anodisoinnissa käytetystä virrasta ja jännitteestä. Riittävän jäähdytystehon takaamiseksi kaikissa tilanteissa jäähdytysjärjestelmä on mitoittettava tasasuuntaajien maksimitehoa vastaavaksi. Kuten aiemminkin on mainittu, sähkövärialtaan jäähdytysteho määräytyy samalla tavalla kuin anodisoinninkin. Tasasuuntaajien sisäinen jäähdytystarve määräytyy niiden ottaman maksimitehon mukaan ja on valmistajan ilmoittaman suuruinen.

Eri kohteille suunnitteluvaiheessa mitoitetut jäähdytystehot on esitetty taulukossa 5.1. Taulukosta nähdään, että anodisointialtaiden jäähdytys muodostaa pääosan tarvittavasta kokonaisjäähdytystehosta. Vedenjäähdytyskoneiden jäähdytysteho on mitoitettu todellista jäähdytystarvetta huomattavasti suuremmaksi. Tämä johtuu siitä, että anodisointilaitoksen toimitukseen on sisällytetty optio neljän anodisointialtaan sekä toisen sähkövärialtaan lisäämisestä. Jäähdytysjärjestelmä on mitoitettu kattamaan jäähdytystarve myös mahdollisen kapasiteetin lisäyksen jälkeen.

*Taulukko 5.1. Mitoitetut jäähdytystehot kohteittain.*

| Jäähdytettävä kohde             | Mitoitettu jäähdytysteho [kW] |
|---------------------------------|-------------------------------|
| Anodisointikylpy I              | 340                           |
| Anodisointikylpy II             | 340                           |
| Anodisointikylpy III            | 340                           |
| Anodisoinnin tasa-suuntaaja I   | 38                            |
| Anodisoinnin tasa-suuntaaja II  | 38                            |
| Anodisoinnin tasa-suuntaaja III | 38                            |
| Sähkövärin kylpy                | 80                            |
| Sähkövärin tasasuuntaaja        | 15                            |
| <b>Yhteensä</b>                 | <b>1229</b>                   |

## 5.2 Lämmitysjärjestelmä

Esimerkkilaitoksessa eri altaiden lämmitys tapahtuu kuuman veden avulla. Vesi kiertää altaissa olevissa putkipattereissa luovuttaen lämpöä kylpyihin. Putkipattereiden pituus on kussakin kylvyssä sellainen, että mitoitusstehon verran lämpöä siirtyy tarvittaessa kylpyyn. Kuuma vesi tuotetaan kiinteistössä sijaitsevan hakelämpölaitoksen avulla. Lämmitysjärjestelmä, lukuun ottamatta putkipattereita, ei kuulu anodisointilinjan toimittussisältöön vaan se on asiakkaan oma järjestelmä. Tästä syystä lämmöntuottamisjärjestelmää ei ole tässä tarkemmin kuvattu.

Tuotantotilan lämmitys on toteutettu tuloilman lämmityksen avulla. Lämmitystarve vaihtelee luonnollisesti kulloisenkin ulkolämpötilan ja tarvittavan ilmamäärän mukaan. Poistettava ilmamäärä on merkittävä tehokkaiden kohdepoistojen takia altaiden pinnalta ja kuljettimista. Tästä syystä myös tuloilman tarve on suuri.

Kuumahuuhtelun korkean lämpötilan takia siitä poistettava ilma sisältää paljon lämpöenergiaa. Tästä syystä sitä hyödynnetään tuloilman lämmittämiseen lämmönsiirtimen avulla. Lämmönsiirtimessä poistoilman sisältämä kosteus kondensoituu, ja se kerätään kondenssivesisäiliöön, josta se johdetaan takaisin prosessialtaaseen. Kondensoituminen tehostaa lämmönsiirtoa ja veden talteenotto vähentää huuhteluun lisättävän veden määrää.

### 5.2.1 Lämmitystehontarve

Taulukossa 5.2 on esitetty eri kylpyjen suunnitellut lämpötilat ja niiden perusteella lasketut putkipattereilta vaaditut lämmönsiirtotehot. Tehontarpeen määrittäminen perustuu lämpöhäviöiden kattamiseen ja ylöslämmityksen vaatimaan tehoon. Kylpyjen lämpötilan ylläpitämisen vaatima teho on huomattavasti pienempi kuin ylöslämmityksen vaatima teho. Putkipatterit on kuitenkin mitoittettava ylöslämmitystehon perusteella, jotta ylöslämmitys pystytään suorittamaan vaaditussa ajassa.

Edellä mainittujen tehojen lisäksi taulukossa on annettu tällä hetkellä laitoksessa käytössä olevat kylpyjen lämpötilat. Ne ovat hieman muuttuneet alkuperäisistä johtuen tiettyistä tuotannollisista syistä. Pääosin lämpötiloja on pystytty laskemaan, mikä vähentää anodisointilinjan lämmönkulutusta. Varsinkin kuumahuuhtelun lämpötilan laskemisella on erittäin suuri merkitys sen energian kulutukseen. Lämpötilaa on pystytty laskemaan huuhtelussa käytettyjen parempien kemikaalien ja lisäaineiden ansiosta laadun kuitenkin huonontumatta. Kuumahuuhtelu on koko laitoksen mittakaavassa eniten lämpöenergiaa vievä prosessi, joten sen tarvitseman lämpöenergian väheneminen heijastuu koko laitoksen energiankulutukseen voimakkaasti.

**Taulukko 5.2.** Lämmitystä vaativien osaprosessien lämpötilat ja mitoitetut lämmitystehot.

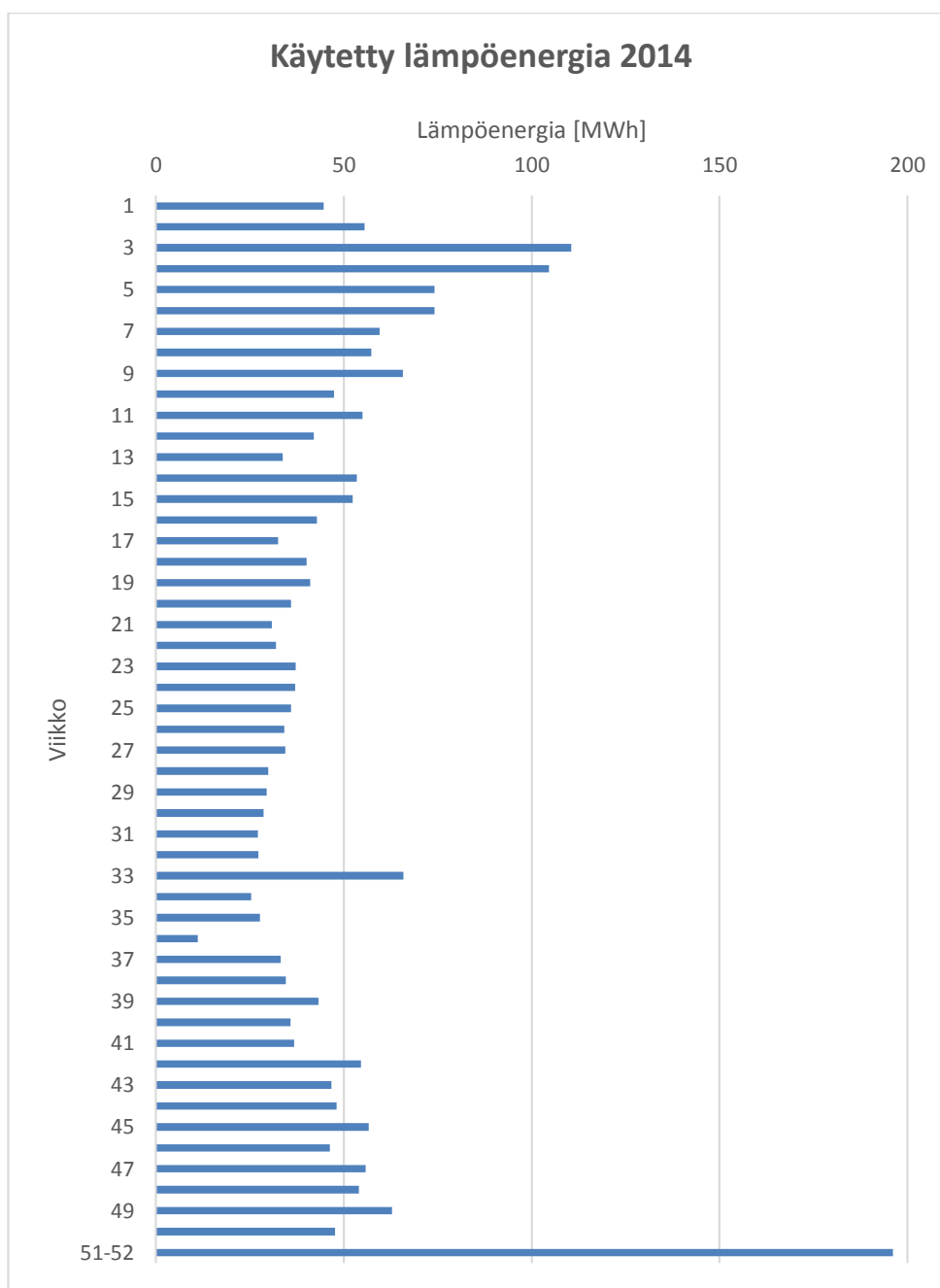
| Osaprosessi         | Suunniteltu<br>lämpötila<br>[°C] | Todellinen<br>lämpötila<br>[°C] | Mitoitettu<br>lämmitysteho<br>[kW] |
|---------------------|----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| Rasvanpoisto        | 60-65                            | 50                              | 200                                |
| E0-peittäus         | 40                               | 50                              | 80                                 |
| E6-peittäus         | 60-70                            | 65                              | 160                                |
| Lämminhuuhtelu      | 40                               | 40                              | 80                                 |
| Noenpoisto (desmut) | 40                               | 20-22                           | 60                                 |
| Kylmätiivistys      | 26-28                            | 28-30                           | 60                                 |
| Kuumahuuhtelu       | 96                               | 80                              | 360                                |
| Kuivaus             | 60                               | 60                              | 160                                |
| <b>Yhteensä</b>     |                                  |                                 | 1160                               |

### 5.2.2 Lämpöenergiankulutus

Anodisointilaitoksen lämmönkulutus vaihtelee jonkin verran riippuen useammastakin tekijästä. Ensinnäkin maantieteellinen sijainti vaikuttaa tuotantotilan lämmitystarpeeseen voimakkaasti. Itse prosessin lämmitystarpeeseen vuodenaika ei vaikuta kovin voimakkaasti paitsi prosessiin lisättävän veden osalta, joka on talviaikaan jonkin verran viileämpää. Muutoin laitoksen lämmönkulutus vaihtelee lähinnä käyttöajan ja tuotannon kulloisenkin kapasiteetin mukaan.

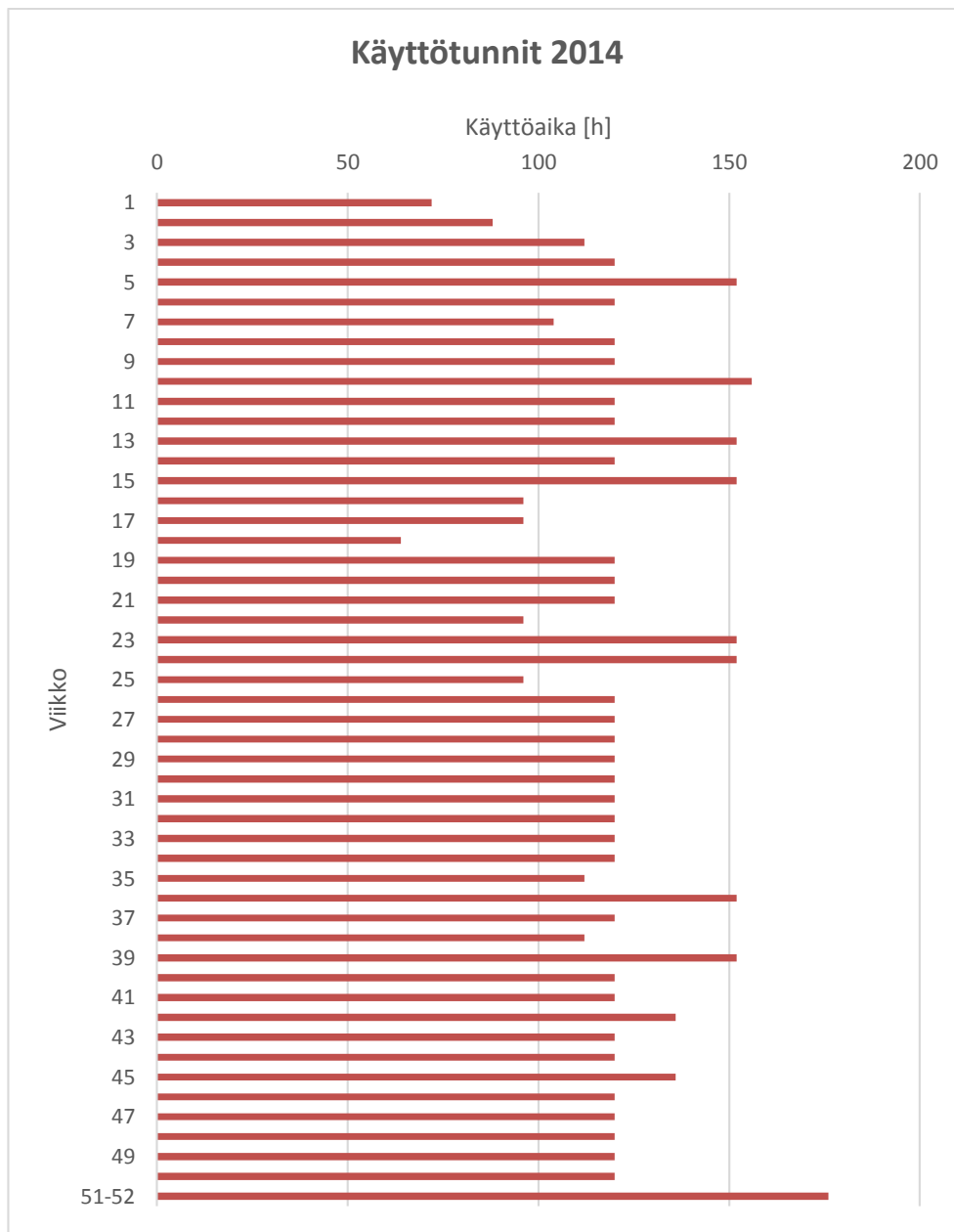
Jos suhteutetaan anodisointilaitoksen lämpöenergiankulutus käyttötunteihin esimerkiksi viikoittain, huomataan siinäkin olevan jonkin verran vaihtelua. Tämä vertailu voidaan tehdä vain lämmityskauden ulkopuolella, koska talvella tuotantotilaa on lämmitettävä jatkuvasti. Käyttötunnit kuvaavat kuitenkin anodisointilinjan käyttöä. Vaihtelu johtuu pääosin siitä kuinka monta kertaa prosessialtaat joudutaan ylöslämmittämään viikon aikana. Ylöslämmitys nimittäin kuluttaa huomattavasti enemmän energiaa kuin käytön-aikainen altaiden lämpimänä pitäminen. Ylöslämmitysten määrä vaihtelee sen mukaan, kuinka monessa vuorossa laitosta ajetaan. Jos laitosta ajetaan kahdessa vuorossa, joudutaan ylöslämmitys suorittamaan joka päivä ennen aamuvuoroa. Kolmessa vuorossa ajettaessa tämä joudutaan tekemään vain esimerkiksi viikonlopun jälkeen, jolloin suhteellinen energiankulutus on pienempi.

Kuvassa 5.2 on esitetty esimerkkilaitoksen lämmitysenergiankulutukset viikoittain vuodelta 2014. Kuvasta nähdään, että lämmönkulutus vaihtelee viikoittain välillä voimakkaastikin. Talviajan vaikutus näkyy selvästi suurempana kulutuksena tuotantotilan lämmitystarpeesta johtuen. Tämä tietenkin vaihtelee paljon myös vuosittain riippuen talven kylmyydestä. Laitoksen käyttöhenkilökunnan mukaan talviaikaan lämmitysenergian tarve on keskimäärin kaksinkertainen kesäaikaan verrattuna.



**Kuva 5.2.** Anodisointilaitoksen lämmitysenergian kulutukset viikoittain vuonna 2014.

Kuvassa 5.3 on esitetty anodisointilaitoksen käyttötunnit viikoittain vuodelta 2014. Kuvasta nähdään, että käyttötunneissa on ajoittain vaihtelua. Korkeammat käyttöajat selittyvät pääosin sillä, että tällöin laitos on ollut käytössä myös viikonloppuna. Keskimääräinen käyttöajan arvo on noin 120 h/vko, mikä vastaa sitä, että laitosta on ajettu arkipäivät kolmessa vuorossa.



**Kuva 5.3.** Anodisointilaitoksen käyttötunnit viikoittain vuonna 2014.

## 6. ESIMERKKILAITOKSESSA SYNTYVÄ YLIJÄÄMÄLÄMPÖ

Ylijäämälämmön määrän ja laadun määrittäminen on ensimmäinen askel, kun aletaan suunnitella mahdollista lämmön talteenottoa. Ensin on tiedettävä, paljonko lämpöä on saatavilla, jotta voidaan miettiä, mihin sitä olisi mahdollista käyttää. Anodisointilaitoksen tapauksessa hukkalämpöä syntyy anodisointialtaissa, kun tasasuuntaajien syöttämä sähköteho muuttuu lämmöksi. Parhaassa tapauksessa lämpötehoa syntyy mitoitettun jäähdystystehontarpeen verran. Tämä vaatii kuitenkin, että linjaa ajetaan tällöin maksimikapasiteetilla. Tämä ei todellisuudessa toteudu kovinkaan usein johtuen pääosin anodisoitavien tuotteiden vaihtelevuudesta ja prosessin luonteesta. Tästä syystä esimerkiksi laitoksessa syntyvä todellinen lämpöteho määritetään tässä luvussa prosessista saatavissa olevien tietojen pohjalta.

Tasasuuntaajien syöttämä sähköteho riippuu siis täysin siitä, minkälainen tuote-erä prosessissa on kulloinkin menossa. Tämä johtuu siitä, että anodisoinnissa halutaan ylläpitää tietty sähkövirrantiheys eli sähkövirta pinta-alaa kohden. Tällöin syötettävän virran suuruus riippuu suoraan erässä olevien tuotteiden yhteispinta-alasta. Pieniä profiileja mahtuu yhteen erään useampia kuin suuria, joten niiden kokonaispinta-ala on suurempi ja vaaditaan enemmän virtaa saman virrantiheyden saavuttamiseksi. Tällöin myös syntyvän ylijäämälämmön määrä vaihtelee voimakkaasti erästä riippuen. Tämän lisäksi käsittelyaika vaihtelee tuotteista ja halutuista anodisointikerroksen ominaisuuksista riippuen.

Luonnollisesti prosessia pyritään ajamaan mahdollisimman lähellä maksimia olevilla tuote-erillä. Läheskään aina tämä ei kuitenkaan ole mahdollista. Tällöin lämpöä syntyy vain osa mitoitetusta maksimitehosta. Tämän lisäksi lämpöä syntyy hieman enemmän varsinaisen anodisointitapahtuman loppuvaiheessa, koska muodostuva oksidikerros lisää alumiinikappaleiden sähköistä vastusta. Erän vaihtuessa lämpöä ei synny lainkaan kyseisestä altaasta, mikä osaltaan myös lisää lämmön synnyn vaihtelevuutta. Tätä vaikutusta tasaa kuitenkin jonkin verran se, että anodisointialtaita on kolme, jolloin yleensä vähintään yhdessä altaassa on prosessi käynnissä. Toisaalta taas altaiden lukumäärä, joissa prosessi on käynnissä, vaihtelee koko ajan, jolloin myös syntyvä lämpöteho vaihtelee. Tämä kaikki johtaa siihen, että lämpötehoa syntyy prosessissa hyvin harvoin mitoitustilannetta vastaava määrä ja silloinkin vain lyhyen aikaa.



## 6.1 Prosessista saatavissa olevat tiedot

Anodisointiprosessin analysointiin käytetään automaatiojärjestelmän tietokantaan tallentuneita eräraportteja. Nämä raportit sisältävät lukuisia tietoja kustakin tuote-erästä, joka käy läpi anodisointiprosessin. Tietoja ovat muun muassa käsittelyn tyyppi, linjalle lähtö- ja poistumisajat, erän kokonaispinta-ala ja sitä vastaava virta halutun virrantiheyden saavuttamiseksi.

Tarkasteltavaksi ajanjaksoksi valittiin vajaan kolmen kuukauden pituinen jakso 12.11.2014–6.2.2015 väliseltä ajalta, jotta saatiin tarpeeksi kattava aineisto. Aineisto sisältää reilun 3000 tuote-erän tiedot. Tämän lisäksi tietoja verrattiin muutaman vuoden takaiseen raporttiin, jotta saatiin selville, oliko tuotannossa tapahtunut merkittäviä muutoksia. Aineistojen tiedot vastaavat erittäin hyvin toisiaan, joten käytettyjä tietoja voidaan pitää riittävän edustavina.

Aineistosta huomataan jo melko nopealla silmäyksellä, että tuote-erät ja niiden koot vaihtelevat hyvin paljon jatkuvasti. Tätä kautta väistämättä myös syntyvän lämmön määrä vaihtelee todella paljon, kuten oli odotettuakin.

## 6.2 Prosessissa syntyvän lämpötehon määrittäminen

Prosessissa syntyvän todellisen lämpötehon määrittäminen tehdään käytettävissä olevan aineiston perusteella. Kustakin erästä on saatavilla haluttu virran arvo, jonka avulla voidaan laskea sähköteho kaavan  $(4.5)$  avulla. Jännitteen arvon oletetaan olevan vakio 20 V, vaikka se saattaakin hieman vaihdella. Sähkötehon oletetaan muuttuvan lämpötehoksi ja siirtyvän jäähdytysveteen 95 % hyötysuhteella. Osa sähkötehosta muuttuu lämmöksi jo virtakiskoissa kylvyn ulkopuolella ja lisäksi altaasta on ympäristöön pieniä lämpöhäviöitä. Tällä tavoin saadaan määritettyä kunkin erän synnyttämä lämpöteho.

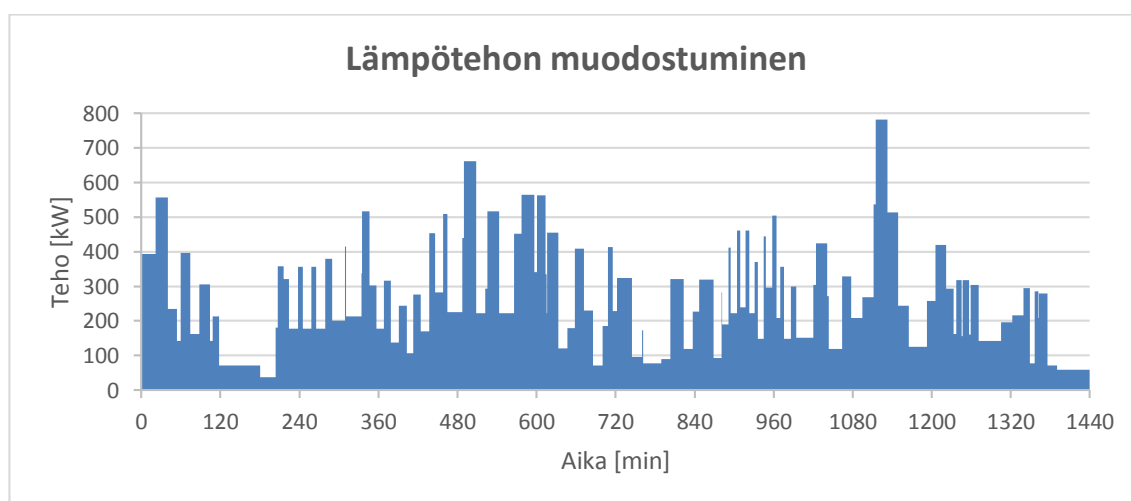
Anodisointialtaita on linjalla kuitenkin kolme kappaletta. Tämä tarkoittaa, että anodisointavana voi olla yhtä aikaa yhdestä kolmeen erää riippuen tilanteesta. Tilanteeseen vaikuttaa millaisin väliajoin erät lähtevät linjalle ja kauanko varsinainen anodisointikäsittely erän kohdalla kestää. Käsittelyajat vaihtelevat halutusta lopputuloksesta ja oksidikerroksen paksuudesta riippuen noin 15–45 minuutin välillä. Eräraportit eivät sisällä varsinaisia käsittelyaikoja, vaan kustakin erästä on tiedossa, milloin se on lähtenyt linjalle sekä käsittelyohjelma ja sen kesto. Esikäsittelyt ennen anodisointia kestävät saman aikaa tuotteista ja käsittelystä riippumatta, joten lähtöaikojen erotuksia vertaamalla pystytään määrittämään, monessako altaassa käsittely on ollut yhtä aikaa käynnissä ja kuinka kauan. Tällöin riittävän lyhyen ajan sisällä linjalle lähteneiden erien tuottamat lämpötehot voidaan laskea yhteen. Käsittelyajoissa on kuitenkin todellisuudessa pientä vaihtelua, joten näin määritetty prosessissa syntyvä lämpöteho ei aivan täysin vastaa todellisuutta. Riittävä tarkkuus kuitenkin saavutetaan.

Taulukkoon 6.1 on koottu aineistosta saatuja yhteenlasketun tehon tunnuslukuja. Keskimäärin syntyväksi lämpötehoksi painotettuna syntymisen kestolla saadaan noin 270 kW. Syntyvä teho vaihtelee kuitenkin lähes nollasta miltei 100 % teoreettisesta maksimista. Todella pieniä ja suuria tehoja syntyy kylläkin suhteessa huomattavasti vähemmän, kuten keskihajonnastakin nähdään. Silti syntyvä lämpöteho vaihtelee hyvin paljon, sillä erien sisältämät tuotteet ovat hyvin vaihtelevia ja erien lähtötiheydessä on eroja. Tästä syystä anodisointi on käynnissä yhtä aikaa kaikissa kolmessa altaassa vain alle 10 % ajasta, mikä vähentää suurien tehojen syntymistä.

**Taulukko 6.1.** Määritetyn, prosessissa syntyvän lämpötehon tunnuslukuja.

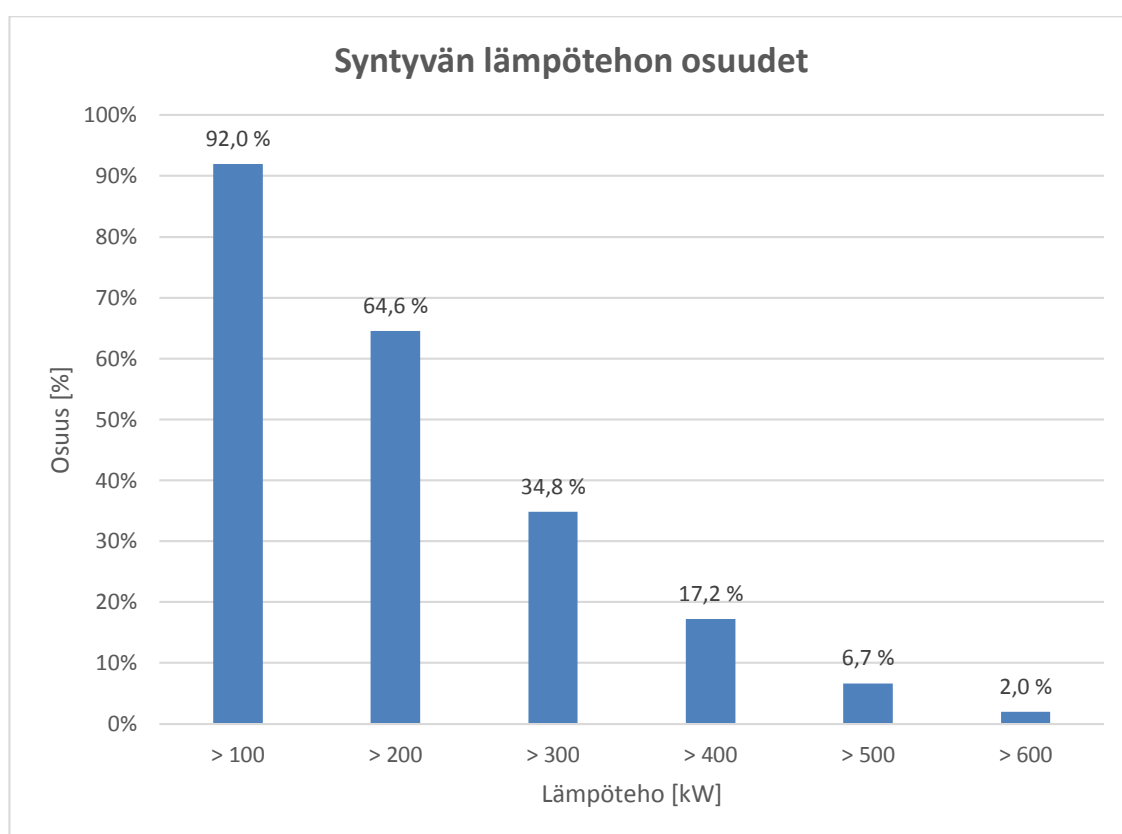
|                  | maks | min | keskiarvo | painotettu<br>keskiarvo | mediaani | keskihajonta |
|------------------|------|-----|-----------|-------------------------|----------|--------------|
| <b>Teho [kW]</b> | 910  | 24  | 289       | 268                     | 263      | 150          |

Kuvassa 6.1 on esitetty esimerkinomaisesti erään vuorokauden ajalta prosessissa syntyvän lämpötehon vaihtelu. Kuvasta nähdään, että tehossa tapahtuu suurta heilahtelua, suuren tehon jälkeen syntyykin taas vain hyvin vähän tehoa. Kuvassa olevien palkkien leveydet kertovat kuinka kauan lämpöä syntyy kyseisellä teholla. Niistä nähdään, että teho vaihtelee erittäin tiheästi. Tämä kaltainen trendi kuvaa hyvin tilannetta laajemmaltikin. Välillä tosin samankokoisia eria on useampi peräkkäin, ja lämmön synty on hieman tasaisempaa. Pääosin vaihtelu on kuitenkin kuvan kaltaista. Lisäksi esimerkiksi vuorojen vaihtuessa on tuotannossa pieniä taukoja, jolloin lämpöä ei synny lainkaan.



**Kuva 6.1.** Prosessissa syntyvän lämpötehon vaihtelu erään vuorokauden aikana.

Prosessissa syntyvässä lämpötehossa tapahtuvien suurten vaihteluiden vuoksi lämmön talteenottoon tarvittavien laitteiden tehoa ei ole järkevää mitoittaa kovin suureksi. Mitä suuremmalle teholle mitoitus tehdään, sitä vähemmän aikaa kyseistä maksimitehoa saadaan prosessista. Kuvassa 6.2 on vertailtu kuinka suuren osan kokonaisuudesta prosessissa syntyy lämpöä vähintään tietyllä teholla. Kuvan mukaan yli 100 kW lämpöteho syntyy prosessissa lähes aina, kun lämpöä ylipäätään syntyy. Osuuksien perusteella lämmön talteenottoteho olisi järkevää mitoittaa välille 100–200 kW, jotta laitteille saadaan riittävän suuri huipunkäyttöaika. Tämän verran lämpötehoa prosessista on siis saatavissa talteen riittävän suuren osan ajasta. Lämmön synnyn vaihtelusta johtuen jonkinlainen varaajasäiliö lämpöpumpun yhteyteen olisi todennäköisesti tarpeellinen, jotta lämmön luovutus on tasaisempaa. Lopulliseen mitoitukseen vaikuttaa tietenkin eniten hukkalämmön käyttökohde, joka määrää tarvittavan tehon.



**Kuva 6.2.** Prosessissa vähintään tietyllä teholla syntyvän lämmön prosenttiosuudet.

## 7. YLIJÄÄMÄLÄMMÖN HYÖDYNTÄMISMAHDOLLISUUDET ANODISOINTILAITOKSESSA

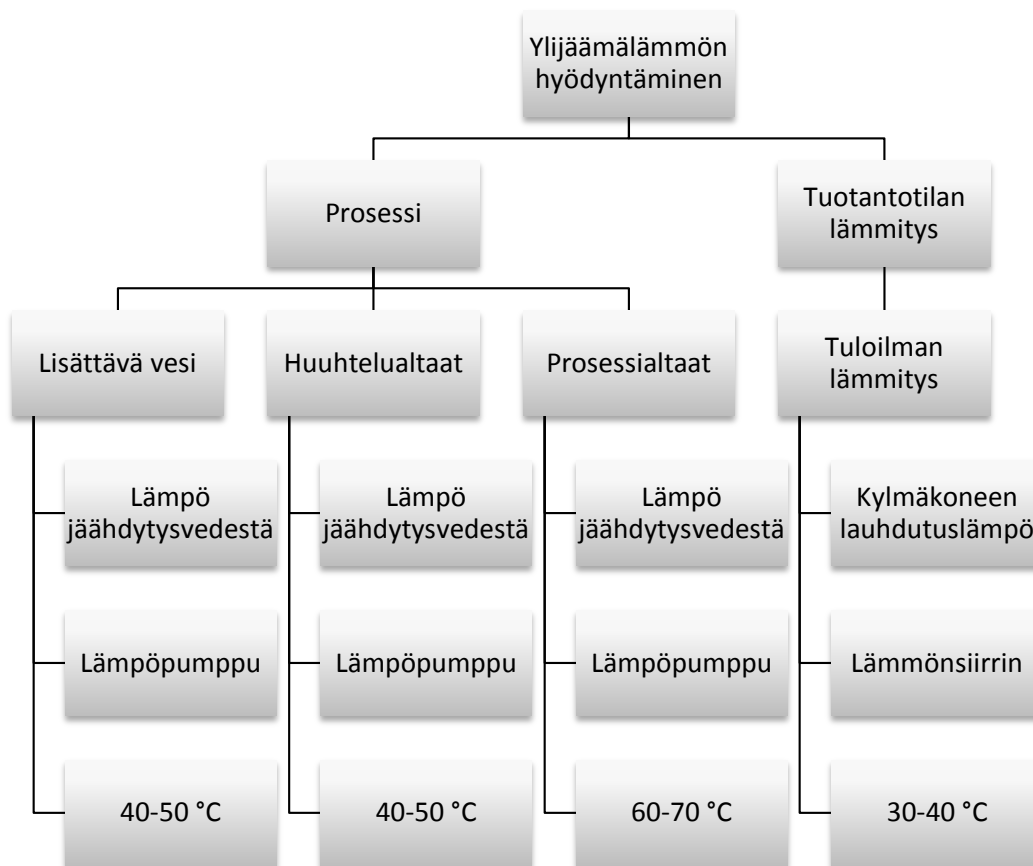
Alumiinin anodisointilaitoksessa ylimääräistä hukkalämpöä syntyy jäähdytysprosessin sivutuotteena. Valtaosa tästä lämmöstä on peräisin anodisointilaitaiden jäähdytyksestä. Jäähdytystarpeen aiheuttaa sähkötehon muuttuminen lämpötehoksi elektrolyysin yhteydessä. Tämän lämmön hyödyntämismahdollisuuksien kartoittaminen on yksi tämän tutkimuksen tavoitteista.

Tässä luvussa tarkastellaan erilaisia hukkalämmön hyödyntämiskohteita anodisointilaitoksessa ja pohditaan millaisia mahdollisuuksia ja haasteita niissä on. Tämän lisäksi tutkitaan, mistä kohtaa prosessia lämpöä on mahdollista ottaa talteen ja minkälaista tekniikkaa ja laitteita sen hyödyntämiseen tarvitaan.

### 7.1 Hyödyntämiskohteet

Mahdollisia hyödyntämiskohteita talteenotetulle lämmölle on anodisointilaitoksesta löydettävissä useita. Ilmeisin niistä on itse kiinteistön ja tuotantotilan lämmitys, joka on yleensä toteutettu tuloilmaa lämmittämällä. Tutkimuksen tilaajan näkökulmasta paras vaihtoehto olisi kuitenkin hyödyntää lämpöä itse prosessissa. Tällä tavoin hukkalämmön hyödyntäminen olisi kiinteämmin osa itse laitostoimitusta eikä riippuisi niin paljon asiakkaan omista järjestelmistä tai laitoksen maantieteellisestä sijainnista lämmitystarvetta ajatellen. Prosessissa lämpöä voitaisiin hyödyntää altaiden lämmitykseen tai prosessin eri vaiheisiin lisättävän veden lämmittämiseen.

Kuvaan 7.1 on koottu eri vaihtoehdot ylijäämälämmön hyödyntämiseen ja mistä kohtaa prosessia lämpö voitaisiin ottaa talteen. Lisäksi kuvassa on kunkin vaihtoehdon kohdalla mainittu, tarvitseeko lämpötilatasoa nostaa lämpöpumpulla vai riittääkö pelkkä lämmönsiirrin. Myös suuntaa antavat lämpötilatasot lämmön hyödyntämiseksi eri tapauksissa on annettu.



**Kuva 7.1.** Ylijäämälämmön mahdolliset hyödyntämiskohteet.

### 7.1.1 Prosessiin lisättävän veden lämmittäminen

Alumiinin anodisointilinjan kaikissa altaissa olevat kylvyt ovat vesipohjaisia lisättyinä sopivilla kemikaaleilla riippuen prosessin vaiheesta. Altaisiin joudutaan lisäämään vettä erilaisten häviöiden kuten haihtumien ja kulkeutumien takia. Tämän lisäksi linjalla on useita huuhtelualtaita, jotka sisältävät pelkästään vettä. Huuhtelualtaiden vettä joudutaan likaantumisen seurauksena korvaamaan puhtaalla vedellä tietyin väliajoin.

Osassa kylvyistä joudutaan käyttämään suoloista puhdistettua eli demineralisoitua vettä (demi-vesi), joka tuotetaan käänteisosmoosin avulla. Puhdistuksen yhteydessä vesi myös pehmenee. Puhdistettua vettä täytyy käyttää tietyistä kemiallisista syistä, jotta prosessi toimii halutulla tavalla. Demi-vettä käytetään anodisointi- ja sähkövärialtaissa, kylmätiivistyksessä sekä prosessin loppupään huuhteluissa mukaan lukien kuumahuuhtelu. Muissa altaissa ja huuhteluissa voidaan käyttää tavallista vesijohtovettä.

Prosessiin lisättävää vettä ei lämmitetä, vaan se lisätään prosessiin sellaisenaan. Poikkeuksena on kuumahuuhteluun menevä demi-vesi, jota esilämmitetään samasta altaasta poistettavan kuuman huuhteluveden avulla kierrättämällä se lämmönvaihtimen kautta.

Demi-vesi tosin ehtii lämmetä jonkin verran jo puhdistusprosessin aikana sekä varastosäiliössä ollessaan. Joka tapauksessa lisättävä vesi on ympäristöä viileämpää. Jos vettä kuitenkin lämmitettäisiin, esimerkiksi noin 40 °C, olisi sillä varsinkin huuhtelutulosta parantava vaikutus. Tämän lisäksi prosessialtaiden lämmitystarve pienenisi, koska lisättävää vettä ei tarvitsisi lämmittää altaissa niin paljon. Myös kappaleiden siirron aiheuttamat lämpöhäviöt pienentyisivät, kun kappaleet eivät jäähtyisi niin paljon huuhteluissa.

Veden lämmittämiseen tarvittava lämpöenergia voitaisiin ottaa talteen jäähdytysvesikierrosta. Lämpöenergian hyödyntämiseen tarvittaisiin lämpöpumppu, jotta lämpötila saataisiin nostettua tarvittavalle tasolle. Prosessiin lisättävän veden lämpötilaksi riittäisi noin 40–50 °C, jolloin lämpöpumpun lämpökerroin on vielä melko korkea. Lämpöpumpun käyttäminen vähentäisi jäähdytyskuormaa varsinaisilta kylmäkoneilta, jolloin niiden sähkönkulutus pienenisi jonkin verran. Lisäksi uutta laitosta suunniteltaessa kylmäkoneet olisi periaatteessa mahdollista mitoittaa pienemmiksi.

Ylijäämälämmön hyödyntäminen lisättävän veden lämmittämiseen ei kuitenkaan vähentäisi primäärienergian kulutusta juurikaan. Vaikka kylmäkoneiden sähkönkulutus pienenisi, kuluttaisi lämpöpumppu jonkin verran enemmän sähköä, joten sähköenergian kulutukseen vaikutus olisi negatiivinen. Altaiden lämmitystarve tosin pienenisi jonkin verran, mutta sen suuruus ei olisi kovinkaan merkittävä. Tästä syystä tämä vaihtoehto ei aiheuttaisi riittävää taloudellista säästöä. Toisaalta tuotteen laatu saattaisi parantua, mutta sillä saavutetun hyödyn mittaaminen on hyvin vaikeaa.

Uuden laitoksen kohdalla lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuutta parantaisi jonkin verran se, että hankittavat kylmäkoneet olisi mahdollista mitoittaa hieman pienemmiksi ja ne olisivat täten myös halvempia. Todennäköisesti kokonaisinvestointi olisi kuitenkin suurempi kuin pelkkien kylmäkoneiden hankinta. Lisäksi lisättävän veden tarve prosessissa ei ole kovinkaan tasainen, joten lämpöpumpun yhteyteen tarvittaisiin mahdollisesti lämminvesivaraaja.

### **7.1.2 Huuhtelualtaiden lämmittäminen**

Toinen vaihtoehto hyödyntää hukkalämpöä prosessissa on huuhtelualtaiden lämmittäminen. Tällä hetkellä näitä altaita ei lämmitetä lainkaan. Lämmittäminen voitaisiin toteuttaa asentamalla lämmityspatterit näihin altaisiin samaan tapaan kuin jo tällä hetkellä lämmitystä vaativissa altaissa on. Niissä kierrätettäisiin lämmintä vettä, joka olisi tuotettu samaan tapaan lämpöpumpulla kuin lisättävän veden lämmittämisen tapauksessa.

Lämmön synnyn epätasaisuus ei tässä vaihtoehdossa haittaisi välttämättä kovin paljon, koska huuhtelualtaita ei ole lähtökohtaisesti pidettävä missään tietyssä lämpötilassa. Periaatteena on, että mitä korkeampi lämpötila huuhtelussa on, sitä parempi huuhtelutulos saavutetaan. Lämpötilaa ei kannata kuitenkaan korottaa kovin korkeaksi, koska sen

saavuttaminen lämpöpumpulla maksaa aina sitä enemmän mitä korkeampi lämpötila halutaan tuottaa. Lisäksi liian korkea lämpötila voisi aiheuttaa ongelmia itse prosessissa.

Lämpöpumppu olisi järkevää mitoittaa sen tehoiseksi, että sitä vastaava teho syntyisi prosessissa suurimman osan ajasta. Jos lämpöä olisi saatavilla riittävästi, voitaisiin sitä ajaa huuhtelualtaisiin mitoitustehon verran. Jos taas lämpöä syntyisi prosessissa jollain hetkellä vähemmän kuin mitoitusteho, ajettaisiin altaisiin vain sen verran tehoa, kuin on kulloinkin saatavilla. Tämä voisi toisaalta johtaa siihen, että huuhtelutulos olisi epätasainen, koska lämpötila ei pysyisi vakiona.

Huuhtelualtaiden lämmittämisestä saatava hyöty olisi myös lähes sama kuin lisättävän veden lämmityksen tapauksessa. Huuhtelutulos paranisi ja kappaleiden siirron aiheuttamat lämpöhäviöt pienenisivät, kun kappaleet eivät jäähtyisi niin paljon huuhteluissa. Tässä tapauksessa ei kuitenkaan saavutettaisi lämmitetyn veden lisäämisen etuja muissa altaissa. Huuhtelualtaat puolestaan pysyisivät lämpimänä paremmin kuin pelkän lämpimän veden lisäämisen avulla. Investointikustannuksia tästä vaihtoehdosta aiheutuisi todennäköisesti enemmän, koska lämmityspatterit olisi asennettava jokaiseen huuhtelualtaaseen, joita voi olla yhteensä yli kymmenen kappaletta riippuen linjasta. Lämmityspatterit saattaisivat myös olla fyysisesti liian suuria huuhtelualtaisiin pienen lämpötilaeron takia. Lisäksi huuhtelualtaat sijaitsevat fyysisesti eri vaiheissa prosessia, joten putkivetoa kertyisi suhteellisen paljon.

### 7.1.3 Prosessialtaiden lämmittäminen

Anodisointiprosessissa on useita lämmittämistä vaativia vaihteita, kuten on jo aiemmin mainittu. Nämä ovat erilaisia allaskylpyjä, jotka ovat haluttujen reaktioiden ja lopputulosten takia pidettävä tietyissä lämpötiloissa. Näiden kylpyjen lämmittäminen on kolmas vaihtoehto ylijäämälämmön hyödyntämiseksi itse prosessissa.

Tässäkin vaihtoehdossa hukkalämpö olisi järkevintä ottaa talteen suoraan prosessin jäähdytysvesikierrosta. Lämpötilatason nostamiseksi tarvittaisiin lämpöpumppu. Altaiden lämmittämiseen tarvittaisiin noin 60 °C vettä. Tämän lämpöisellä vedellä voitaisiin pitää lämpimänä kaikki muut altaat paitsi kuumahuuhtelu. Sen lämpötila on 80–95 °C riippuen tilanteesta. Tällaisiin lämpötiloihin pääseminen lämpöpumpputekniikalla tuottaa vaikeuksia, joten kuumahuuhtelualtaan lämmittäminen olisi hoidettava muulla tavoin. Lisäksi näin suurella lämpötilaerolla lämpöpumpun lämpökerroin on jo niin matala, ettei sen käyttäminen ole todennäköisesti kannattavaa.

Prosessialtaiden lämmittämisessä hukkalämmöllä on myös se ongelma, että altaiden ylöslämmitys ennen prosessin käynnistymistä olisi hoidettava muilla keinoin. Hukkalämpöähän ei synny ennen varsinaisen anodisointireaktion alkamista. Tämä johtaa siihen, että olisi oltava erillinen lämmitysjärjestelmä lämpöpumpun rinnalla, jonka avulla altaiden lämmittäminen ennen työvuoron alkua hoidettaisiin. Tällä järjestelmällä lämmi-

tettäisiin myös kuumahuuhtelun allas. Toisin sanoen lämmitys olisi toteutettava edelleen samalla tavalla kuin aiemminkin, sen lisänä vain olisi lämpöpumppujärjestelmä. Mahdollista olisi myös esilämmittää lämmitysvettä lämpöpumpun avulla ja tuottaa haluttu lopullinen korkeampi lämpötila varsinaisen lämmitysjärjestelmän avulla.

Hyvänä puolena prosessialtaiden lämmittämisessä hukkalämmön avulla olisi primäärienergiantarpeen väheneminen. Todellinen hyöty riippuu millä tavoin lämmitysenergia muutoin tuotetaan. Tämän lisäksi jäähdystarve kylmäkoneilla pienenesi, joten ne voitaisiin periaatteessa mitoittaa pienemmiksi. Haasteena tässäkin tapauksessa on lämmön synnyn ja sen tarpeen mahdollinen eriaikaisuus, minkä seurauksena tarvittaisiin jonkinlainen varaa-asäiliö. Tämän lisäksi tarvittaisiin rinnakkainen lämmitysjärjestelmä ylöslämmitystä ja kuumahuuhtelua varten. Taloudellista kannattavuutta huonontaa korkeamman lämpötilan tuottamisen seurauksena pienentyvä lämpöpumpun lämpökerroin verrattuna matalampaan lämpötilatasoon.

#### 7.1.4 Tuotantotilan lämmittäminen

Jos syntyvää ylijäämälämpöä ei pystytä hyödyntämään itse prosessissa, yksi vaihtoehto on hyödyntää sitä tuotantotilan lämmittämiseen. Tuotantotilan lämmitysratkaisu ei kuulu laitostoimitukseen, vaan on asiakkaan päätettävissä oleva asia. Yleensä lämmitys kuitenkin tapahtuu tuloilmaa lämmittämällä. Riippuu tietenkin ilmasto-olosuhteista, tarvitseeko tuotantotilaa lämmittää välttämättä lainkaan. Voi myös olla, että sitä joudutaan itse asiassa jäähdyttämään. Anodisointilinjalta poistettava ilmamäärä on merkittävä, joten myös korvausilmaa tarvitaan paljon. Tätä kautta tuloilman lämmitykseen kuuluu myös energiaa melko paljon ainakin kylmän ilmaston alueella. Toisaalta tällöinkään ei kesäaikaan lämmitystä juuri tarvita varsinkin, kun prosessista on jonkin verran lämpöpölväitä ympäristöön muutoinkin.

Tuloilman lämmittämiseen pystyttäisiin käyttämään jo olemassa olevassakin laitoksessa kylmäkoneiden lauhdutuslämpöä melko pienillä muutoksilla. Kylmäkoneilta poistuva lauhdutuslämpö on sitoutunut lämmönsiirtonesteeseen. Sen sijaan, että lämpö lauhdutaan katolla olevien nestejäähdyttimien avulla ulkoilmaan, voitaisiin se käyttää hyödyksi tuloilman lämmitykseen. Tämä voisi tapahtua siten, että tuloilmakanavassa olisi lämmönsiirrin, jonka kautta lämmönsiirtoneste kiertäisi lämmittäen ilmaa ja jäähtyen samalla itse. Jos neste sisältäisi enemmän lämpöenergiaa kuin ilman lämmittämiseen tarvittaisiin, voitaisiin ylimääräinen lämpö lauhduttaa ulkoilmaan. Tilanteen ollessa päinvastainen käytettäisiin ilman lopulliseen lämmittämiseen olemassa olevaa järjestelmää.

Lauhdutuslämmön hyödyntäminen tuloilman lämmittämiseen saattaisi vaatia kylmäkoneen lauhdutuslämpötilan nostamista. Tämä puolestaan aiheuttaisi kylmäkoneen kylmäkertoimen huononemisen ja täten myös sähkönkulutuksen kasvamista jonkin verran. Lauhdutuslämpöä ei ole saatavilla, kun prosessi ei ole käynnissä, joten tuotantotilan



lämmittämiseen tarvittaisiin myös rinnakkainen järjestelmä. Ylijäämälämmön käyttö siis lähinnä vähentäisi ulkoisen lämmitysenergian tarvetta, joten kannattavuus riippuisi siitä, millä tavoin se on tuotettu.

Esimerkkilaitoksen tapauksessa lauhdutuslämmön hyödyntämistä heikentää merkittävästi vapaajäähdytyksen käyttäminen. Juuri silloin, kun tuloilmaa tarvitsee lämmittää eniten, pystytään prosessin jäähdyttämiseen käyttämään lähes ilmaista vapaajäähdytystä eikä lauhdutuslämpöä kylmäkoneilta synny. Kesällä taas lämmitystä ei tarvita. Toisaalta investointi tuloilman lämmittämiseksi ei olisi kovin suuri, joten se saattaisi olla silti kannattava. Myös jäähdytysveden lämpöä voitaisiin käyttää lämpöpumpun avulla tässäkin vaihtoehdossa.

## 7.2 Hyödyntämiseen tarvittava tekniikka

Prosessissa syntyvän ylijäämälämmön hyödyntämiseksi tarvitaan omanlaisensa laitteistot riippuen hyödyntämiskohteesta ja -tavasta. Yksinkertaisimmalla laitteistolla selvitäisiin siinä tapauksessa, että kylmäkoneen lauhdutuslämpö hyödynnettäisiin tuotantotilan lämmittämiseen tuloilmaa lämmittämällä. Tällöin ei tarvittaisi kuin lämmönsiirrin tuloilmakanavaan sekä siihen liittyvät putkistot ja pumppu lämmönsiirtonesteen kierrättämiseksi. Tämä vaihtoehto olisi myös selvästi investointikustannuksiltaan edullisin.

Ylijäämälämmön hyödyntäminen itse prosessissa vaatisi lämpöpumpun lämpötilaston nostamiseksi riippumatta hyödyntämiskohteesta. Syntyvä ylijäämälämmön määrä vaihtelee kuitenkin hyvin voimakkaasti riippuen kunkin erän sisältämistä tuotteista. Tästä syystä maksimimäärä lämpöä, minkä mukaan jäähdytysjärjestelmä on mitoitettu, syntyy vain hyvin pienen osan ajasta. Periaatteessa lämpöpumpuilla voitaisiin korvata kylmäkoneet kokonaan, mutta tällöin ne olisi mitoitettava huipputehon mukaan, mikä ei ole järkevää. Huipputeholla syntyvällä lämpömäärälle ei välttämättä löytyisi edes käyttöä.

Huipputehon sijaan mitoitus on tehtävä jollekin osateholle, joka syntyy suurimman osan ajasta. Tarvittava teho on aina tapauskohtainen ja riippuu hyödyntämiskohteesta. Esimerkkilaitoksen tapauksessa tarvittava teho olisi joitain satoja kilowatteja. Tämän suuruinen lämpöteho syntyy prosessissa suurimman osan ajasta, jolloin lämpöä olisi todennäköisesti saatavissa riittävässä määrin myös silloin, kun sitä tarvitaan.

Anodisointilaitoksen hukkalämmön hyödyntämiseksi tarvittavan kokoluokan teollisuuslämpöpumput ovat tyypiltään mekaanisia kompressorilämpöpumppuja. Muut yksityiskohdat kuten kompressorityyppi ja niiden lukumäärä riippuvat halutusta tehosta sekä valmistajasta. Lämpöpumpun lisäksi tarvittaisiin mahdollisesti lämminvesivaraaja taasaamaan lämmön synnyn ja tarpeen vaihtelua. Tarvittaisiin myös lämmönvaihtimia joitain kappaleita riippuen lämmön käyttökohteesta. Prosessialtaiden lämmityksessäkään ei voitaisi käyttää putkipattereita pienen lämpötilaeron takia, koska se puolestaan vaatisi suuren lämmönsiirtopinta-alan, jolloin putkien pituus kasvaisi liian suureksi. Sen sijaan

kylpyjä olisi kierrätettävä lämmönsiirtimien läpi, jotta lämpöä saataisiin siirrettyä tarpeeksi tehokkaasti. Muuta tarvittavaa laitteistoa ovat luonnollisesti kytkentään tarvittavat putkistot ja pumput.

Vaihtoehtoja, mistä kohtaa prosessia ylijäämälämpö otetaan talteen, on kaksi. Ensimmäinen vaihtoehto on, että prosessissa syntynyttä lämpöä hyödynnetään ottamalla sitä talteen suoraan jäähdytysvesikierrosta. Tällöin prosessissa lämmentyneestä jäähdytysvedestä siirretään pois lämpöenergiaa lämpöpumpun avulla, jolloin vesi tietenkin jäähtyy vähentäen samalla ulkoista jäähdytystarvetta kylmäkoneella.

Toinen vaihtoehto hyödyntää lämpöpumppua on kytkeä se kylmäkoneen lauhdutuspuolelle, jolloin se ottaa lämpönsä kylmäkonetta jäähdyttävästä lämmönsiirtonesteestä. Tämä kytkentätapa vaatii, että aina kun lämpöpumpulla halutaan tuottaa lämpöenergiaa, täytyy kylmäkonetta käyttää jäähdytykseen. Esimerkiksi vapaajäähdytystä ei voida tällöin hyödyntää, vaikka se muuten olisikin mahdollista. Lisäksi uutta laitosta suunniteltaessa jäähdytysjärjestelmää ei voida mitoittaa yhtään pienemmäksi toisin kuin ensimmäisessä vaihtoehdossa. Hyöty tässä kytkentätavassa on, että kylmäkone on jo nostanut lämpöenergian lämpötilatasoa jonkin verran, joten lämpöpumpulla sitä ei tarvitse enää nostaa niin paljon.

## 8. HYÖDYNTÄMISVAIHTOEHTOJEN VAATIMA TEHO

Edellisessä luvussa esiteltiin yleisellä tasolla eri vaihtoehtoja anodisointilaitoksessa syntyvän hukkalämmön hyödyntämiseksi. Näistä vaihtoehtoista valittiin kaksi, prosessialtaiden lämmittäminen ja lisäävän veden lämmittäminen, joita tarkastellaan tässä luvussa tarkemmin. Tavoitteena on määrittää millainen lämpöteho kummassakin tapauksessa tarvitaan esimerkklaitoksesta saatavissa olevien tietojen avulla ja verrata sitä luvussa 6 määritettyyn prosessissa syntyvään lämpötehoon.

### 8.1 Prosessialtaiden lämmittäminen

Prosessissa syntyvää lämpöä voidaan käyttää tiettyjen prosessialtaiden työaikaiseen lämpötilan ylläpitoon. Kaikkia altaita ei kuitenkaan voida pitää lämpimänä, kuten kuumahuuhtelua, liian korkean lämpötilan takia. Tämän lisäksi esimerkklaitoksessa desmut-altaan lämpötila on niin matala (20–22 °C), että sitä ei juurikaan tarvitse käytön aikana lämmittää. Myöskään E6-peittauksen allas ei tarvitse kuin ylöslämmittää, sillä siinä tapahtuvassa reaktiossa vapautuu lämpöä ja sitä joudutaan itse asiassa jäähdyttämään käytön aikana. Ylijäämälämpöä voidaan kuitenkin hyödyntää seuraavien altaiden lämpötilan ylläpitoon (suluissa lämpötilat):

- Rasvanpoisto (50 °C)
- E0-peittäus (50 °C)
- Lämminhuuhtelu (40 °C)
- Kylmätiivistys (30 °C)

Prosessialtaiden lämpimänä pitämisen tehontarve vastaa altaiden lämpöhäviöitä. On siis määritettävä yllä olevien altaiden lämpöhäviöt, jotta saadaan selville, paljonko lämpötehoa niiden kattamiseen tarvitaan. Lämpöhäviöitä syntyy eniten altaiden nestepinnasta konvektiolla ilmastoinnin ja sekoituksen seurauksena. Tätä vaikutusta vähentävät jonkin verran altaissa olevat kannet. Lisäksi häviöitä tapahtuu johtumalla altaiden seinämien läpi. Altaita ei ole varsinaisesti lämpöeristetty, sillä ne on valmistettu 20 mm paksusta polypropeenimuovista, joka itsessään toimii hyvänä eristeenä. Myös tavaraerien mukana kulkeutuu pieni määrä lämpöenergiaa. Sen vaikutus voi olla joko lämmittävä tai jäähdyttävä riippuen edellisen kylvyn lämpötilasta, mutta suuruudeltaan se on vain joitain kilowatteja.

Taulukossa 8.1 on määritetty yllä lueteltujen allaskylpyjen lämpöhäviöt. Määrittämiseen on käytetty yrityksessä käytössä olevia suunnitteluohjeita. Ohjeissa olevien kuvaajien avulla pystytään graafisesti määrittämään lämpöhäviöt pinta-alaa kohti nestepinnasta, kun altaissa on ilmastointi (liite A, kuva 1) sekä seinämistä (liite B, kuva 5). Seinämien häviöt on annettu kuvaajassa teräsaltaalle, mutta muovialtaan on oletettu vastaavan lähes eristettyä teräsallasta. Kuvaajista luetut arvot eivät ole aivan tarkkoja, mutta niiden avulla lämpöhäviöt kuitenkin pystytään arvioimaan riittävällä tarkkuudella. Ympäristön lämpötilaksi on oletettu 20 °C.

**Taulukko 8.1.** Lämpöhäviöt altaissa, joiden lämmittämiseen hukkalämpöä on mahdollista hyödyntää.

|  | Rasvanpoisto | E0-peittaus | Lämminhuuhtelu | Kylmätiivistys | Yhteensä |
|--|--------------|-------------|----------------|----------------|----------|
| Lämpötila [°C]                             | 50           | 50          | 40             | 30             |          |
| Leveys [m]                                 | 2,0          | 0,9         | 0,9            | 2,0            |          |
| Nesteen pinta-ala [m <sup>2</sup> ]        | 17,6         | 7,9         | 7,9            | 17,6           |          |
| Lämpöhäviö pinnasta [kW/m <sup>2</sup> ]   | 3,1          | 3,1         | 1,8            | 1,0            |          |
| Lämpöhäviö pinnasta [kW]                   | 54,6         | 24,6        | 14,3           | 17,6           | 111,0    |
| Seinämien pinta-ala [m <sup>2</sup> ]      | 75,9         | 60,3        | 60,3           | 75,9           |          |
| Lämpöhäviö seinämistä [kW/m <sup>2</sup> ] | 0,05         | 0,05        | 0,04           | 0,03           |          |
| Lämpöhäviö seinämistä [kW]                 | 3,8          | 3,0         | 2,4            | 2,3            | 11,5     |
| Lämpöhäviöt yhteensä [kW]                  | 58,4         | 27,6        | 16,7           | 19,9           | 122,5    |

Taulukossa on lueteltu lähtötietoina altaiden lämpötilat ja leveydet. Muut mitat ovat kaikilla altailla samat, pituus on 8,8 m ja korkeus 2,7 m. Taulukosta nähdään, että huomattavasti suurin osa lämpöhäviöistä tapahtuu nestepinnalta konvektion avulla ja vain

noin 10 % seinämien läpi. Materiaalin lämpenemisestä aiheutuvaa lämpöhäviötä ei ole otettu huomioon, sillä sen suuruus on vain muutaman prosentin luokkaa. Kokonaislämpöhäviöksi kaikista neljästä altaasta saadaan noin 125 kW. Tämän verran prosessissa syntyvää hukkalämpöä siis pystyttäisiin käyttämään hyväksi prosessialtaiden lämpimänä pitämiseen. Lämpöpumpun tuottama lämpöteho on kuitenkin sen kuluttaman sähkötehon verran suurempi kuin sen lämmönlähteestä ottama teho. Hyödynnettävissä oleva hukkalämmön teho on siis jonkin verran pienempi kuin todellinen tarve. Lämpöpumpun sähkönkulutus riippuu lämpökertoimesta, johon puolestaan vaikuttaa haluttu lämpötila-  
taso. Jos verrataan hyödynnettävissä olevan tehon suuruutta prosessissa syntyvään lämpötehoon, huomataan, että tämä noin 100 kW teho on saatavissa lähes aina. Toisaalta hukkalämpöä olisi tarjolla enemmänkin suurimman osan ajasta, joten kaikkea potentiaalia ei tule tässä vaihtoehdossa hyödynnettyä.

## 8.2 Lisättävän veden lämmittäminen

Toinen tarkasteltava vaihtoehto ylijäämälämmön käyttökohteeksi on prosessiin lisättävän veden lämmittäminen. Tässä tarkastellaan tilannetta, jossa lämpimiin prosessialtaisiin lisättävä vesi esilämmitettäisiin johonkin tiettyyn lämpötilaan lämpöpumpun avulla. Tällöin veden lämmittäminen säästäisi ensisijaisen lämmitysenergian kulutuksessa, koska vettä ei tarvitsisi lämmittää altaissa. Kylmä vesi nimittäin aiheuttaa hetkellisen lämpöhäviön kasvun altaassa, kun sitä lisätään ja se alkaa lämmetä altaan lämpötilaan. Vettä esilämmitämällä olisi siis myös mahdollista saada taloudellista säästöä.

Lisättävän veden lämmittämiseen vaadittavan keskimääräisen tehon määrittämiseksi on ensin selvitettävä, kuinka paljon vettä prosessialtaisiin keskimäärin lisätään aikayksikössä. Tämä muodostui hieman ongelmalliseksi, koska lisättävän veden kulutusta ei millään tavoin mitata allaskohtaisesti. Esimerkkilaitoksesta saatiin tietää ainoastaan koko anodisointilinjan keskimääräinen vedenkulutus. Tästä syystä asiaa selvitettiin myös eräästä toisesta Galvatekin toimittamasta tuotantolaitoksesta, joka vastaa kokoluokaltaan varsinaista esimerkkilaitosta. Sieltä saatiin hieman yksilöllisempiä vedenkulutuksia, mutta varsinaisia mittauksia ei sielläkään ole käytössä, joten saadut kulutustiedot ovat tässäkin tapauksessa jonkinasteisia arvioita ja keskimääräisiä arvoja. Niiden avulla ei pystytäkään arvioimaan, kuinka paljon vedenkulutus ja sitä kautta sen lämmitystarve vaihtelee ajallisesti. Vedenkulutus nimittäin vaihtelee tuotannon määrän ja tuotteen mukaan.

Saatujen tietojen perusteella arvioitiin anodisointilinjan alkupään lämpimiin kylpyihin lisättävän tavallisen vesijohtoveden keskimääräiseksi virtaukseksi 1,5 m<sup>3</sup>/h. Veden lämmittämiseen tarvittava teho määritetään sen mukaan, että veden lämpötilaa nostetaan lämpöpumpun avulla 30 °C. Tällöin veden lämmittämiseen tarvittava lämpöteho  $Q$  määräytyy seuraavan yhtälön mukaan [11, s. 183]:

$$Q = \dot{m} c \Delta T \quad (8.1)$$

missä  $\dot{m}$  on veden massavirta [kg/s],  $c$  on veden ominaislämpökapasiteetti 4,19 kJ/kgK [11, s. 914] ja  $\Delta T$  on lämpötilaero [K] eli kuinka paljon vettä lämmitetään.

Yhtälön (8.1) avulla lasketuksi keskimääräiseksi lämpötehoksi saadaan 52,4 kW. Suunnilleen tätä tehoa vastaava määrä primäärienergiaa myös säästyisi, jos lisättävä vesi esilämmitettäisiin. Tätä vastaava lämpöteho syntyy prosessissa käytännössä aina. Teho on kuitenkin sen verran pieni, että sen lämpöpumpulla tuottamisen aiheuttamat mahdolliset säästöt eivät voi muodostua kovinkaan suuriksi. Lisäksi veden virtaus altai-siin ei ole tasainen, vaan riippuu muun muassa tuotannosta, mikä vaikeuttaa omalta osaltaan ylijäämälämmön hyödyntämistä tähän. Näiden syiden takia veden lämmittäminen ei ole yksinään varteenotettava vaihtoehto hukkalämmön hyödyntämiseen. Kuitenkin yhdessä prosessialtaiden lämmittämisvaihtoehdon kanssa se parantaisi kannattavuutta, sillä se ei juurikaan suurentaisi investointia, mutta lisäisi kuitenkin primäärienergian korvaamisesta aiheutuvia säästöjä. Näitä kahta vaihtoehtoa vastaava teho myös syntyisi prosessissa lähes aina.

## 9. TALOUDELLINEN TARKASTELU

Hyvin yksinkertaistetusti sanottuna yrityksen tavoitteena on tehdä mahdollisimman paljon voittoa sijoitettua pääomaa kohden. Jotta tämä olisi mahdollista, on yrityksen tehtävä investointeja. Investointi on siis yksinkertaisesti rahan käyttämistä tulon hankkimiseksi. Investointi voi olla luonteeltaan joko rahoitus- tai reaali-investointi. Rahoitusinvestoinnissa sijoitetaan rahaa toiseen yritykseen esimerkiksi ostamalla sen osakkeita. Reaali-investoinnissa puolestaan rahaa sidotaan menoina tuotannontekijöihin tulon saamiseksi. [12, s. 295-296]

Investoinneissa on aina mukana aikaulottuvuus. Useimmiten investointien vaikutukset ulottuvat pitkällekin tulevaisuuteen, joten vaikutusten mahdollisimman oikeanlainen arviointi on tärkeää. Tästä syystä investointipäätöksiin sisältyy aina tiettyä epävarmuutta. Mitä pidemmälle tulevaisuuteen investointi ulottuu, sitä enemmän epävarmuus kasvaa. Epävarmuuden lisäksi vaikeuksia investointipäätöksiä tehdessä aiheuttaa investoinnista seuraavien hyötyjen mittaaminen. Ne ovat usein harkinnanvaraisia asioita, jotka ovat hyvin vaikeasti mitattavissa. Tällaisia asioita voivat olla esimerkiksi työntekijöiden viihtyvyyden tai tuotteen laadun paraneminen. [12, s. 297]

Kolmas investointipäätöksiin liittyvä ongelma on investoinnista aiheutuvien kulujen ja tuottojen eriaikaisuus ja jakaantuminen pitkällekin aikavälille. Tähän ongelmaan on kehitetty erilaisia laskentamenetelmiä, joilla eriaikaiset suoritukset pystytään tekemään vertailukelpoisiksi keskenään. Näitä menetelmiä käyttämällä voidaan arvioida investointipäätöksen kannattavuutta, ja käyttää niitä apuna tehtäessä lopullista päätöstä investoinnista. [12, s. 297-298]

### 9.1 Investointilaskentamenetelmät

Investointilaskentamenetelmiä on olemassa useita erilaisia. Eniten käytettyjä ovat nykyarvomenetelmä, annuiteettimenetelmä ja sisäisen korkokannan menetelmä. Näitä kutsutaan myös perusmenetelmiksi. [12, s. 318-322]

Nykyarvomenetelmässä kaikki investoinnin tuotot ja kustannukset tulevaisuudessa diskontataan nykyhetkeen laskentakorkokantaa käyttäen. Diskonttaaminen tehdään rahan arvon alenemisen takia, sillä mitä pidemmän ajan päästä esimerkiksi jokin tietty tuotto saadaan, sitä pienempi arvo sillä on nykyhetkellä. Investoinnin voidaan katsoa olevan kannattava, jos sen nykyarvo on suurempi kuin nolla. Toisin sanoen investoinnin kannattavuus edellyttää, että siitä aiheutuvien nettotuottojen nykyarvo on suurempi kuin perushankintakustannus. [12, s. 318]

Annuiteettimenetelmässä investoinnin perushankintakustannus jaetaan taulukoitujen annuiteettitekijöiden avulla investointiajanjakson eri vuosille annuiteeteiksi. Annuiteettitekijät riippuvat pitoajasta ja laskentakorkokannasta. Investointi on sitä kannattavampi, mitä suurempi nettotuottojen annuiteetti on verrattuna perushankintakustannuksen annuiteettiin. [12, s. 321]

Sisäisen korkokannan menetelmä on puolestaan kytköksissä nykyarvomenetelmään. Tavoitteena on määrittää se laskentakorkokanta, jolla investoinnin nykyarvo on 0. Tätä korkokantaa verrataan tavoitteeksi asetettuun pääoman tuottoprosenttiin. Sisäisen korkokannan on oltava tavoiteltavaa tuottoprosenttia suurempi, jotta investointi olisi kannattava. Mitä suurempi korkokanta on, sitä kannattavampi myös investointi on tämän menetelmän mukaan. [12, s. 322]

Perusmenetelmien lisäksi hyvin yleisesti käytetään myös muutamaa yksinkertaisempaa menetelmää. Ne ovat investoinnin tuottoprosenttimenetelmä ja takaisinmaksuajan menetelmä. Näistä ensin mainittu on yksinkertaistettu menetelmä sisäisen korkokannan menetelmästä. Yksinkertaisuus johtuu siitä, että menetelmässä on luovuttu suoritusten eriaikaisuuden huomioimisesta. Tällä tavoin laskelmat yksinkertaistuvat huomattavasti. [12, s. 324]

Takaisinmaksuajan menetelmässä puolestaan nimensä mukaisesti määritetään se aika, jonka kuluessa investointi maksaa itsensä takaisin. Tämä on siis aika, jonka kuluessa investoinnista kertyvät nettotuotot ovat perushankintakustannuksen suuruiset. Tämän menetelmän mukaan investointi on sitä kannattavampi mitä lyhempi takaisinmaksuaika on. Menetelmä ei kuitenkaan huomioi tämän jälkeen syntyviä tuottoja, joten sen käyttö ainoana menetelmänä ei ole suotavaa. Tästä huolimatta menetelmä on melko yleisesti käytössä helppokäyttöisyytensä takia. [12, s. 325-326]

## 9.2 Lämpöpumpuinvestoinnin kannattavuus

Kuten muidenkin investointien, myös ylijäämälämmön hyödyntämisen tärkein edellytys on sen taloudellinen kannattavuus. Hukkalämmön hyödyntämisen tapauksessa kyse on saadusta säästöstä verrattuna siihen, että lämpöenergia tuotettaisiin kuten ennenkin käyttäen jotakin primäärienergianlähdettä. Jos investointi ei tuota tarpeeksi säästöjä tulevaisuudessa, ei sen tekeminen ole järkevää. Aiheutuvien säästöjen on oltava lisäksi tarpeeksi suuret verrattuna perushankintakustannuksen suuruuteen, jotta investointi alkaa tuottamaan mahdollisimman nopeasti voittoa.

Tässä tapauksessa investointi koostuu lämpöpumpusta sekä sen hyödyntämiseen tarvittavista oheislaitteista kuten putkistoista, pumpuista, varaajasäiliöstä ja lämmönsiirtimistä sekä asennustyöstä. Käytön aikana lämpöpumppu kuluttaa sähköä, jonka määrään vaikuttaa se millaisella lämpökertoimella pumppu toimii. Lämpökertoimeen vaikuttaa paitsi valmistaja myös lämpöpumpulla tuotettava lämpötilataso. Mitä enemmän lämpö-



tilaa halutaan lämpöpumpulla korottaa, sitä enemmän se myös kuluttaa sähköä. Lämpöpumpun lisäksi käyttökuluja aiheuttavat veden ja kylpyjen kierrättämiseen tarvittavat pumput, jotka myös kuluttavat sähköä.

Lämpöpumpuinvestoinnin kohdalla kannattavuus siis määräytyy sen mukaan kuinka paljon primäärienergiaa sen avulla voidaan korvata. Lämmitysenergian määrän lisäksi kannattavuuteen vaikuttavat tietenkin sekä primäärienergian että sähkön hinta. Kyse on pohjimmiltaan siis säästetyn primäärienergian ja lämpöpumpun kuluttaman sähkön hintojen suhteesta. Sähkön hinnan voidaan ajatella olevan vakio tiettyä ajankohtana, mutta lämmitysenergian hinta puolestaan vaihtelee sen mukaan, tuotetaanko se itse vai ostetaanko se ulkopuoliselta toimittajalta. Jos lämpöenergia tuotetaan itse, vaikuttaa sen kustannuksiin eniten käytettävä polttoaine.

Anodisointilaitoksen lämmön talteenoton tapauksessa lämpöpumppu käyttää lämmönlähteenään prosessin jäähdytysvettä. Tämä tarkoittaa, että lämpöpumpun tuottaman lämmitysenergian lisäksi myös sen tuottama jäähdytysvaikutus tulee käytettyä hyödyksi. Tällä kaksinkertaisella hyödyllä on erittäin suuri positiivinen vaikutus investoinnin kannattavuuteen. Se parantaa kannattavuutta, koska lämpöpumpun todellisesta sähkönkulutuksesta voidaan säästöjä määritettäessä vähentää se määrä, joka kylmäkoneelta kuluisi sähköä saman jäähdytysmäärän tuottamiseen.

Lämpöpumpuinvestoinnin kannattavuuden arviointi tehdään sen pohjalta, että lämpöpumpun avulla tuotetaan tiettyjen prosessialtaiden käytönaikainen lämpimänä pito ja prosessiin lisättävän tavallisen veden lämmittäminen. Luvussa 8 korvattavaksi lämpötehoksi saatiin tällöin prosessialtaiden osalta 122,5 kW ja veden osalta 52,4 kW. Yhteensä tuotettava lämpöteho olisi noin 175 kW. Lämpöpumpulla olisi tuotettava noin 60 °C vettä, jotta lämmönsiirtimissä saavutetaan riittävän suuri lämpötilaero. Lämpöpumpun lämpökertoimen on tällöin arvioitu olevan 3,5, kun lämmönlähteenä on 15 °C jäähdytysvesi [13, 14]. Todellisuudessa lämpökerroin riippuu hieman valmistajasta ja tilanteesta, mutta laskennassa käytetään edellä mainittua arvoa.

Kannattavuuslaskennassa käytettäviä lähtöarvoja on koottu taulukkoon 9.1. Lämpöpumpun tuottaman lämpöenergian ja sen kuluttaman sähköenergian määrän laskennassa oletetaan, että lämpöpumpun käyttöaika vuodessa on 90 % koko anodisointilaitoksen käyttöajasta. Tämä johtuu siitä, että prosessissa ei synny hyödynnettävää lämpöä aivan koko aikaa, varsinkaan vuoron alkaessa. Taulukossa oleva kylmäkoneen sähkönkulutus vastaa sitä tilannetta, että lämpöpumpun jäähdytysvaikutus tuotetaan kylmäkoneella. Vapaajäähdytyksen hyödyntämistä ei oteta laskennassa huomioon. Kylmäkoneen kylmäkertoimenä käytetään arvoa 4. Prosessialtaiden lämmitykseen hukkalämpöä hyödynnettäessä täytyy kylpyjä kierrättää lämmönsiirtimien läpi. Tämä aiheuttaa pumppauskustannuksia, jotka on laskettu taulukkoon, kun pumppujen yhteistehon on arvioitu olevan 8 kW. Sähkön hintana käytetään Tilastokeskuksen julkaisemaa sähkön hintaa kuluttajatyypeittäin [15].

Investoinnin perushankintakustannuksen suuruus on melko karkea arvio, joka perustuu erään lämpöpumppuvalmistajan ilmoittamaan nimellisteholtaan 150 kW lämpöpumpun budjettihintaan [13] sekä muihin kustannuksiin kuten putkista, pumpuista, varaajasta, lämmönsiirtimistä ja asennustyöstä aiheutuviin kustannuksiin. Näiden muiden kustannusten suuruuden arviointi tarkemmin on hankalaa, koska ne riippuvat muun muassa laitteiden lopullisesta mitoituksesta ja sijainnista sekä muista tekijöistä, joita ei tämän työn osalta ole mahdollista arvioida. Tästä syystä kokonaisinvestoinnin suuruus voi todellisuudessa jonkin verran vaihdella, mikä aiheuttaa kannattavuuslaskelmaan epävarmuutta.

**Taulukko 9.1.** Kannattavuuslaskennan lähtöarvot.

| Lämpöpumpulla tuotettava teho                  | 175 kW     |
|--|------------|
| Lämpöpumpun aiheuttama jäähdytysteho           | 125 kW     |
| Lämpöpumpun käyttöaika                         | 5576 h/a   |
| Tuotetun lämpöenergian määrä                   | 976 MWh/a  |
| Lämpöpumpun sähkönkulutus                      | 279 MWh/a  |
| Kylmäkoneen sähkönkulutus                      | 174 MWh/a  |
| Kierrätyspumppujen (8 kW) sähkönkulutus        | 45 MWh/a   |
| Nettosähkönkulutus                             | 149 MWh/a  |
| Sähkön hinta                                   | 85 €/MWh   |
| Sähkön kustannus                               | 12 679 €/a |
| Lämpöpumppuinvestoinnin perushankintakustannus | 100 000 €  |

Varsinainen kannattavuuden arviointi tehdään takaisinmaksuaikamenetelmän avulla ja määrittämällä lämpöpumpun käytöstä kertyvät vuotuiset säästöt. Laskennassa ei huomioida korkojen vaikutusta. Monimutkaisempia menetelmiä ei tässä käytetä, sillä kyse on melko suurpiirteisestä tarkastelusta, jossa jo monet lähtötiedoista ovat jonkinasteisia arvioita. Lisäksi investointia ei suunnitella suoraan mihinkään varsinaiseen kohteeseen vaan kyse on enemmän yleisestä lämpöpumpun käytön kannattavuudesta lämmön talteenottoon anodisointilaitoksessa.

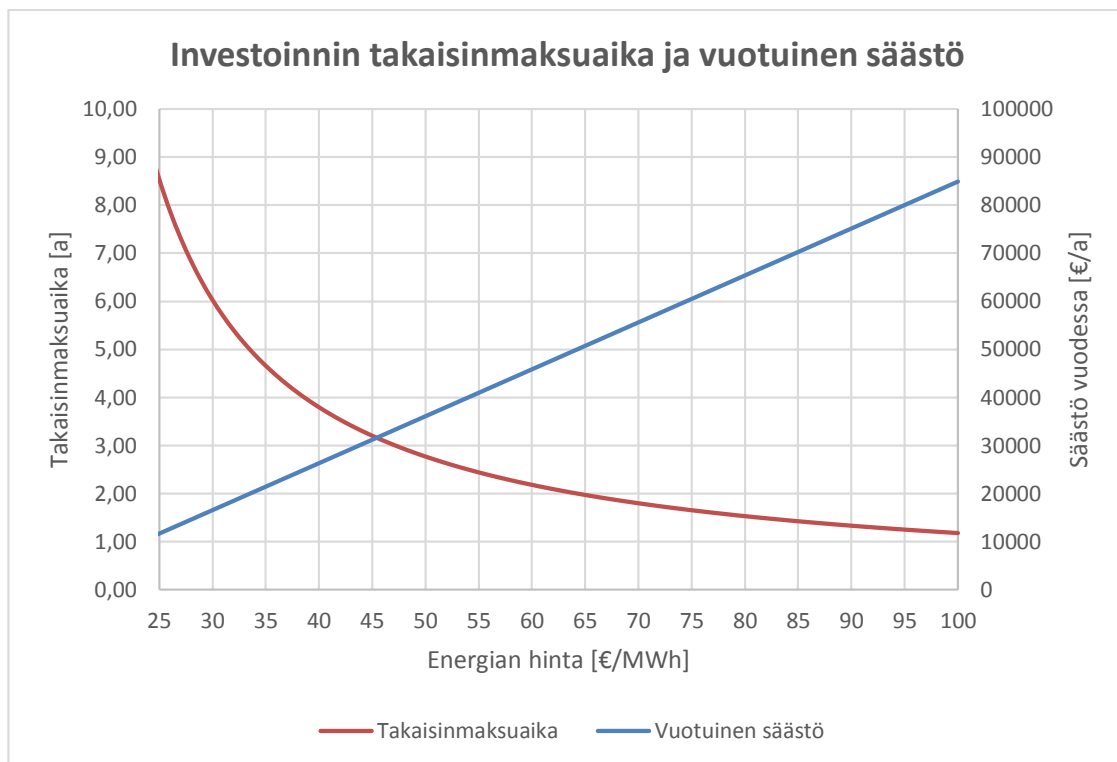
Takaisinmaksuaika määräytyy sen mukaan, minkä hintaista lämpöpumpulla korvattava lämpöenergia on. Takaisinmaksuajat lasketaan tapaukselle, että yritys ostaa lämpöenergian ulkopuolelta kaukolämpönä sekä tapauksille, että yritys tuottaa lämpönsä itse eri polttoaineita käyttäen. Tarkasteltaviksi polttoaineiksi on valittu metsähake sekä kevyt ja raskas polttoöljy. Polttoaineiden hinnat, lämpöpumpulla korvattavan energian hinta, vuotuiset säästöt ja takaisinmaksuaika eri vaihtoehtoissa on koottu taulukkoon 9.2.

Kaukolämmön hintana käytetään Suomen keskihintaa vuoden 2015 alussa [16]. Ras-  
kaan polttoöljyn hinta on arvoitu tuontihinnan [17] (keskiarvo 2013), johon on lisätty  
valmisteverot ja huoltovarmuus- ja öljysuojamaksut [18], sekä sen energiasisällön avul-  
la [19]. Kevyen polttoöljyn osalta käytetään vuoden 2014 arvioitua keskihintaa [20] ja  
energiasisältöä [19]. Öljytuotteiden hintoihin vaikuttaa suoraan raakaöljyn maailman-  
markkinahinta, joten ne heilahtelevat välillä voimakkaastikin. Öljyn viimeaikaista jyrk-  
kää hinnanlaskua ei ole laskelmissa otettu huomioon. Metsähakkeen hintana käytetään  
vuoden 2014 lopun hintaa [21]. Eri polttoaineiden hintoja määritettäessä on katti-  
lahyötysuhteena pidetty 90 %, sillä osa polttoaineen energiasisällöstä menee häviöihin.  
Hinnat ovat lisäksi arvonlisäverottomia. Eri polttoainevaihtoehtoissa ei oteta huomioon  
lämpölaitoksen käyttökustannuksia.

**Taulukko 9.2.** Polttoaineiden hinnat, vuotuiset säästöt ja takaisinmaksuajat.

| Polttoaine        | Energian<br>hinta<br>[€/MWh] | Korvattavan<br>energian hin-<br>ta [€/a] | Säästö<br>[€/a] | Takaisin-<br>maksu-<br>aika [a] |
|-------------------|------------------------------|--|-----------------|---------------------------------|
| Metsähake         | 28                           | 27108                                    | 14428           | 6,9                             |
| Raskas polttoöljy | 73                           | 71239                                    | 58559           | 1,7                             |
| Kaukolämpö        | 80                           | 78070                                    | 65390           | 1,5                             |
| Kevyt polttoöljy  | 90                           | 87828                                    | 75149           | 1,3                             |

Kuvassa 9.1 on vielä esitetty lämpöpumppuinvestoinnin takaisinmaksuajan ja siitä ai-  
heutuvien vuotuisten säästöjen riippuvuus korvattavan lämmitysmuodon lämmitysener-  
gian hinnasta. Kuvasta nähdään, että halvemmilla energian hinnoilla takaisinmaksuaika  
on melko pitkä, mutta laskee nopeasti korvattavan energian hinnan noustessa. Kuitenkin  
energian hinnan kallistuessa takaisinmaksuajan lyheneminen hidastuu. Primäärienergian  
korvaamisesta aiheutuvat säästöt puolestaan kasvavat lineaarisesti energian kallistuessa.  
Säästöt ovat suoraan verrannolliset energian hintaan vähennettynä lämpöpumpun säh-  
könkulutuksella, joka pysyy vakiona.



**Kuva 9.1.** Investoinnin takaisinmaksuaika ja vuotuinen säästö.

Se, millainen takaisinmaksuaika on hyväksyttävissä, riippuu hyvin yksilöllisesti tilanteesta, jossa investointipäätöstä ollaan tekemässä. Ensinnäkin sillä, onko kyse lisäinvestoinnista olemassa olevaan laitokseen vai kokonaan uuden laitoksen yhteydessä tehtävästä investoinnista, on suuri merkitys. Uuden laitoksen kohdalla kokonaisinvestointi on huomattavasti suurempi verrattuna lämpöpumppuun, joten sen merkitys kokonaisuuden kannalta ei ole niin merkittävä. Tällöin voidaan lämpöpumpun osalta tyytyä hieman pidempäänkin takaisinmaksuaikaan. Yleisesti ottaen, jotta investointia voidaan tosissaan alkaa harkitsemaan, täytyy takaisinmaksuajan olla alle 5 vuotta. Mieluusti sen tulisi kuitenkin olla alle 3 vuotta.

Kuvan 9.1 mukaan korvattavan energian hinnan ylittäessä 35 €/MWh investointia voidaan harkita. Kolmen vuoden takaisinmaksuaikaan päästään korvattavan energian hinnan ollessa hieman yli 45 €/MWh. Tällöin vuotuinen säästö takaisinmaksuajan jälkeen on noin 33 000 €. Taulukossa 9.2 tarkasteltujen korvattavien energiamuotojen kohdalla lämpöpumppuinvestointi voisi tulla kyseeseen muiden paitsi metsähakkeen kohdalla, joka on selvästi halvempi energiamuoto muihin verrattuna. Muiden energiamuotojen kohdalla takaisinmaksuaika on jopa selvästi alle 2 vuotta, mikä on jo todella lyhyt aika. Lisäksi säästöjä kertyisi vuodessa 55 000–75 000 € riippuen tilanteesta.

Esimerkkilaitoksen kohdalla lämmitysenergia tuotetaan omalla lämpölaitoksella, joka käyttää polttoaineenaan puuhaketta. Tällöin tuotetun lämpöenergian kustannukset ovat

niin pienet, ettei lämpöpumppuinvestointi olisi kovinkaan kannattava. Lisäksi lämmön talteenoton ja hyödyntämisen toimivuudesta käytännössä ei ole täyttä varmuutta, joten siihen liittyy omat riskinsä, joita ei välttämättä kannata ottaa kannattavuuden ollessa muutenkin heikko.

Suomessa energiaa säästävän investoinnin kannattavuutta on mahdollista parantaa myös hakemalla siihen työ- ja elinkeinoministeriön myöntämää energiatukea. Investointitukea on mahdollista saada hankkeisiin, jotka edistävät energiansäästöä ja energiatehokkuutta. Investoinnin on oltava luonteeltaan sellainen, että sen avulla korvataan olemassa olevaa tekniikkaa eli sitä ei myönnetä uudishankintoihin. Tuki on kuitenkin harkinnanvarainen ja sen myöntämisestä päätetään aina tapauskohtaisesti. Enimmillään investointituki voi olla 20 % investoinnin suuruudesta. [22]

## 10. YHTEENVETO

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää ja kehittää alumiinin anodisointilaitoksen lämmön talteenottomahdollisuuksia. Alusta asti oli melko selvää, että ylijäämälämmön hyödyntämiseen tultaisiin tarvitsemaan lämpöpumpua. Selvitystyön ensimmäisenä vaiheena oli määrittää, kuinka paljon hukkalämpöä prosessissa syntyy esimerkkilaitoksen kohdalla. Tietoa ei ollut suoraan saatavilla, vaan se oli määritettävä tasasuuntaajien syöttämän sähkötehon ja muiden prosessista saatujen tietojen perusteella. Tämä osoitautui ennakoitua hankalammaksi saatavilla olevien tietojen luonteen vuoksi. Määrityksen tuloksena selvisi, että lämmön syntyminen prosessissa on hyvin vaihtelevaa, mikä aiheuttaa omalta osaltaan haasteita sen hyödyntämiselle. Seuraavaksi pohdittiin erilaisia käyttökohteita talteen otettavalle lämmölle, mutta huomattiin, että selkeitä käyttökohteita oli yllättävän vaikea löytää. Joitain vartenotettavia vaihtoehtoja kuitenkin löydettiin, ja niiden kohdalla tilannetta tarkasteltiin myös taloudellisesti.

Anodisointilaitoksessa siis syntyy aina prosessin jäähdytyksen seurauksena ylijäämälämpöä, jota on mahdollista hyödyntää. Lämpötehoa syntyy välillä lyhyen aikaa hyvinkin paljon, mutta vastaavasti välillä taas erittäin vähän. Lämmön synnyssä on suurta ajallista vaihtelua, joka johtuu pääosin prosessin luonteesta ja tuote-erien vaihtelevuudesta. Tästä syystä keskimääräinen syntyvä lämpöteho prosessissa esimerkkilaitoksen kohdalla on vain noin 30 % luokkaa mitoitetusta kokonaisjäähdytystehosta. Tämä oli jokseenkin yllättävää. Lisäksi prosessissa syntyvä lämpö on alhaisen lämpötilansa takia melko huonolaatuista, minkä takia sen suora hyödyntäminen on mahdotonta. Sen sijaan lämpötilatasoa on nostettava lämpöpumpun avulla. Järkevällä lämpöpumpun käyttöasteella hyödynnettävissä oleva ylijäämälämmön teho on vielä jonkin verran pienempi kuin keskimäärin syntyvä teho.

Hukkalämpöä on siis saatavilla ainakin jossain määrin, mutta seuraavan haasteen aiheuttaa sen hyödyntäminen. Anodisointiprosessista ei ole löydettävissä yhtä selkeää käyttökohdetta talteen otettavalle lämmölle. Prosessialtaiden käytönaikainen lämpimänä pitäminen on ehkä selkein vaihtoehto. Lämpötilaltaan kaikkein korkeimpien, ja tätä kautta eniten lämmitysenergiaa vaativien altainen lämmitykseen ylijäämälämpöä ei kannata hyödyntää, koska ylijäämälämmön lämpötilatasoa jouduttaisiin nostamaan niin paljon, että lämpöpumpun lämpökerroin muuttuu liian huonoksi. Lämpötilaltaan matalampien altainen kohdalla hukkalämpöä voidaan kuitenkin hyödyntää, vaikkakin lämpöteho jää tällöin alhaisemmaksi. Kaikkien altainen ylöslämmittämiseen ennen työvuoroa tarvitaan kuitenkin erillinen lämmitysjärjestelmä lämpöpumpun rinnalle. Tämä vähentää osaltaan lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuutta. Toinen kannattavuutta heikentävä

asia on kylpyjen kierrättäminen lämmönsiirtimien läpi pumppujen avulla. Myös lämmönsiirtimien likaantuminen voi muodostua ongelmaksi.

Toinen potentiaalinen hyödyntämiskohde talteen otetulle lämmölle on erilaisten prosessiin lisättävien vesien lämmittäminen. Tästä saatavaa hyötyä määritettäessä muodostui kuitenkin ongelmaksi se, ettei eri altaisiin lisättävästä veden määrästä ollut saatavilla kunnollista mittaustietoa. Karkea arvio veden kulutuksesta pidemmällä aikavälillä oli saatavissa, mutta sen tarkempi jakautuminen eri altaiden välillä ja ajallinen vaihtelu jäivät epäselviksi. Jonkinlainen arvio tiettyihin altaisiin lisättävän veden lämmittämisen aiheuttamasta hyödystä pystyttiin kuitenkin tekemään. Sen sijaan huuhteluvesien lämmittämisen aiheuttama hyöty parantuneen huuhtelutuloksen kautta todettiin olevan liian vaikeasti määritettävissä. Energian säästämisen kannalta sillä ei saavutettaisi suurtakaan hyötyä. Lisäksi huuhtelualtaat lämpiävät jo nyt hieman tavaraerien ja -ripustimien kuljettaman lämpöenergian seurauksena. Anodisointiprosessin lopputuloksen kannalta lämpötilan vaihtelut eri altaiden välillä eivät saa olla liian suuria, joten huuhteluvettä ei edes voitaisi lämmittää kovin kuumaksi.

Ylijäämälämpöä voitaisiin hyödyntää myös esimerkiksi tuotantotilan lämmitykseen. Tällöin hyödyntäminen rajoittuisi vain lämmityskaudelle, jonka pituus taas vaihtelee suuresti maantieteellisen sijainnin mukaan. Lisäksi lämmitysjärjestelmä ei kuulu anodisointilaitoksen toimitukseen, joten tätä vaihtoehtoa ei tässä työssä tarkasteltu sen enempää. Se voisi kuitenkin olla yksi mahdollinen vaihtoehto tiettyjen olosuhteiden vallitessa.

Anodisointilaitoksen ylijäämälämmön hyödyntäminen lämpöpumppua käyttämällä voi olla taloudellisesti kannattavaa tiettyjen ehtojen täyttyessä haasteista huolimatta. Tärkein ehto on, että myös lämpöpumpun jäähdytysvaikutus hyödynnetään. Tämä toteutuu luonnollisesti, kun lämpö otetaan jäähdytysvesikierrosta. Lähtökohtaisesti varsinaista jäähdytysjärjestelmää ei voida kuitenkaan mitoittaa pienemmäksi, sillä riittävä jäähdytys on varmistettava kaikissa tilanteissa kuten esimerkiksi lämpöpumpun häiriötilanteissa. Lisättävän veden lämmittämisen tapauksessa voi olla myös tilanne, että vettä ei jollain hetkellä lisätä lainkaan, joten sitä vastaavaa lämpötehoa ei saada käytettyä mihinkään. Lämpöpumppua joudutaan siis tällöin käyttämään osateholla, jolloin myös jäähdytysvaikutus pienenee.

Toinen tärkeä kriteeri on lämpöpumpun avulla korvattavan lämmitysenergian hinta suhteessa lämpöpumpun käyttökuluihin, jotka muodostuvat pääosin sen sähkönkulutuksesta. Suurimmalla osalla lämmitysenergian tuotantotavoista voidaan päästä jo todella lyhyisiin takaisinmaksuaikoihin investoinnin osalta ja useiden kymmenien tuhansien euron säästöihin vuositasolla. Toisaalta investoinnin suuruuden arviointi tarkasti on vaikeaa, koska se voi vaihdella melko paljon laitoskohtaisesti putkivetojen ja laitteiston sijainnin suhteen. Tämä aiheuttaa epävarmuutta kannattavuuden arviointiin.

Yhteenvetona voidaan todeta, että anodisointilaitoksessa syntyy riittävästi ylijäämälämpöä, jota voidaan mahdollisesti myös kannattavasti hyödyntää. Käytännössä hyödyntäminen saattaa kuitenkin osoittautua hankalaksi, koska epävarmuustekijöitä on olemassa paljon. Ensinnäkin lämmön synty on hyvin vaihtelevaa ja epätasaista ja riippuu kulloisestakin tuotannosta, joten siinä voi olla suuria eroja eri laitosten välillä. Vaihtelevuudesta johtuen lämmön synty ja tarve eivät välttämättä kohtaa ajallisesti, mikä voi myös aiheuttaa ongelmia. Tästä syystä lämmön talteenoton kannattavuus tulisi arvioida aina tapauskohtaisesti, jotta saadaan selville, paljonko ylijäämälämpöä todellisuudessa syntyy ja toisaalta pystytään hyödyntämään. Tämä voi olla kuitenkin vaikeaa, koska uuden laitoksen kohdalla se pitää tehdä suunnitteluvaiheessa eikä esimerkiksi tuotannon tarkkaa määrää ja luonnetta välttämättä tiedetä vielä silloin.

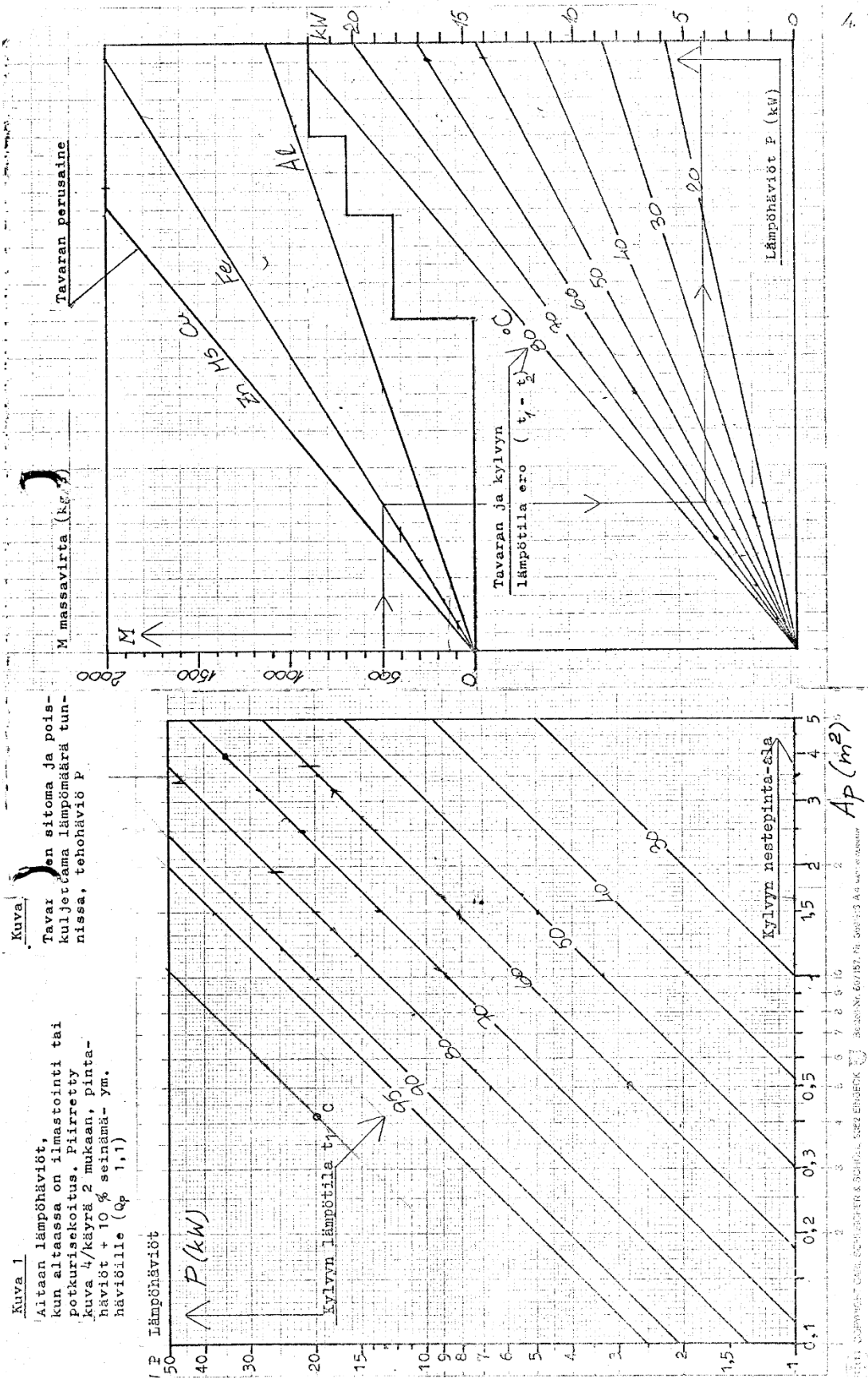


## LÄHTEET

- [1] A. Aittomäki (toim.), Kylmätekniikka, 3. painos, Suomen kylmäyhdistys ry, Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä, 2008, 406 s.
- [2] P. Hakala, E. Kaappola, Kylmälaitoksen suunnittelu, 2. painos, Opetushallitus, Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä, 2007, 268 s.
- [3] Å. Melinder, Handbook on Indirect Refrigeration and Heat Pump Systems, Svenska Kyltekniska Föreningen, Kullavik, Ruotsi, 2010, 148 p.
- [4] Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen - Lämpöpumppu- ja ORC-sovellukset, Motiva, 2014, 71 s. [viitattu: 19.11.2014], saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/8900/Ylijaamalammon\\_taloudellinen\\_hyodyntaminen\\_lampopumppu\\_ORC\\_www.pdf](http://www.motiva.fi/files/8900/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_lampopumppu_ORC_www.pdf).
- [5] Tuotannon hukkalämpö hyödyksi, Motiva, 2013, 11 s. [viitattu: 19.11.2014], saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon\\_hukkalampo\\_hyodyksi.pdf](http://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf).
- [6] Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen - ylijäämälämpöenergia-analyysit, Motiva, 2014, 60 s. [viitattu: 19.11.2014], saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/8899/Ylijaamalammon\\_taloudellinen\\_hyodyntaminen\\_-\\_ylijaamalampoenergia-analyysit.pdf](http://www.motiva.fi/files/8899/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_-_ylijaamalampoenergia-analyysit.pdf).
- [7] Anodisointi-esite, Purso Oy, 2003, 4 s. [viitattu: 8.12.2014], saatavissa: [http://www.purso.fi/downloadable\\_files/esitteet/purso\\_anodisointi\\_2003\\_fin.pdf](http://www.purso.fi/downloadable_files/esitteet/purso_anodisointi_2003_fin.pdf).
- [8] Teknologiateollisuus ry, Raaka-ainekäsikirja 5: Alumiinit, Teknologiainfo Teknova Oy, Tammer-Paino Oy, Tampere, 2006, 237 s.
- [9] Kemiallinen ja sähkökemiallinen pintakäsittely osa I, Suomen Galvanotekninen yhdistys, TummaVuoren Kirjapaino Oy, Vantaa, 1996, 286 s.
- [10] L. Satka, Energiakustannukset galvaanisessa pintakäsittelylaitoksessa, Diplomitö, Lappeenranta, 1982, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energiateknikan laitos, 101 s.
- [11] Y. Cengel, M. Boles, Thermodynamics: An Engineering Approach, 6. painos, McGraw-Hill, New York, 2007, 976 p.
- [12] V. Riistama, E. Jyrkkiö, Operatiivinen laskentatoimi, perusteet ja hyväksikäyttö, 15. painos, WSOY, Porvoo, 1996, 417 s.

- [13] J. Alpua, Liiketoimintajohtaja, Oilon Scancool Oy, Vantaa, sähköpostikeskustelu 28.11.2014 ja 2.12.2014.
- [14] Teollisuuden LTO-lämpöpumput-esite, Pemco Oy, 2013, 4 s. [viitattu: 10.3.2015], saatavissa:  
[http://www.pemco.fi/09/download/esitteet/Pemco\\_esite\\_Lampopumppu\\_2013.pdf](http://www.pemco.fi/09/download/esitteet/Pemco_esite_Lampopumppu_2013.pdf)
- [15] Tilasto: Energian hinnat [verkkojulkaisu], ISSN=1799-7984, 4. Vuosineljännes 2014, Liitekuvio 5, Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin, Helsinki: Tilastokeskus, [viitattu: 25.3.2015], saatavissa:  
[http://tilastokeskus.fi/til/ehi/2014/04/ehi\\_2014\\_04\\_2015-03-19\\_kuv\\_005\\_fi.html](http://tilastokeskus.fi/til/ehi/2014/04/ehi_2014_04_2015-03-19_kuv_005_fi.html)
- [16] Energiateollisuus ry, Kaukolämmön hinta 1.1.2015 alkaen, 2015, 4 s. [viitattu: 26.3.2015], saatavissa: [http://energia.fi/sites/default/files/hinta\\_010115\\_0.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/hinta_010115_0.pdf)
- [17] Tilasto: Energian hinnat [verkkojulkaisu], ISSN=1799-7984, 4. vuosineljännes 2014, Liitekuvio 1, Öljyn tuontihinnat, Helsinki: Tilastokeskus, [viitattu: 26.3.2015], saatavissa: [http://www.stat.fi/til/ehi/2014/04/ehi\\_2014\\_04\\_2015-03-19\\_kuv\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehi/2014/04/ehi_2014_04_2015-03-19_kuv_001_fi.html)
- [18] Tilasto: Energian hinnat [verkkojulkaisu], ISSN=1799-7984, 4. vuosineljännes 2014, Liitetaulukko 1, Energiaverot sekä huoltovarmuus- ja öljysuojamaksut, Helsinki: Tilastokeskus, [viitattu: 26.3.2015], saatavissa:  
[http://www.stat.fi/til/ehi/2014/04/ehi\\_2014\\_04\\_2015-03-19\\_tau\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehi/2014/04/ehi_2014_04_2015-03-19_tau_001_fi.html)
- [19] Polttoaineiden lämpöarvot, Motiva, 2010, 5 s. [viitattu: 1.4.2015], saatavissa:  
[http://www.motiva.fi/files/3193/Polttoaineiden\\_lampoarvot\\_hyotysuhteet\\_ja\\_hiilidioksidin\\_ominaispaastokertoimet\\_seka\\_energiahinnat\\_19042010.pdf](http://www.motiva.fi/files/3193/Polttoaineiden_lampoarvot_hyotysuhteet_ja_hiilidioksidin_ominaispaastokertoimet_seka_energiahinnat_19042010.pdf)
- [20] Tilasto: Energian hinnat [verkkojulkaisu], ISSN=1799-7984, 4. vuosineljännes 2014, Liitekuvio 2, Tärkeimpien öljytuotteiden kuluttajahinnat, Helsinki: Tilastokeskus, [viitattu: 26.3.2015], saatavissa:  
[http://www.stat.fi/til/ehi/2014/04/ehi\\_2014\\_04\\_2015-03-19\\_kuv\\_002\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehi/2014/04/ehi_2014_04_2015-03-19_kuv_002_fi.html)
- [21] Tilasto: Energian hinnat [verkkojulkaisu], ISSN=1799-7984, 4. vuosineljännes 2014, Liitekuvio 3, Voimalaitospolttoaineiden hinnat lämmöntuotannossa (Korjattu 23.3.2015), Helsinki: Tilastokeskus, [viitattu: 26.3.2015], saatavissa:  
[http://www.stat.fi/til/ehi/2014/04/ehi\\_2014\\_04\\_2015-03-19\\_kuv\\_003\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehi/2014/04/ehi_2014_04_2015-03-19_kuv_003_fi.html)
- [22] Investointituet, Motiva, verkkosivu, [viitattu: 1.4.2015], saatavissa:  
[http://www.motiva.fi/toimialueet/energiakatselmustoiminta/tem\\_n\\_tukemat\\_energiakatselmukset/katselmus-\\_ja\\_investointituet/investointituet](http://www.motiva.fi/toimialueet/energiakatselmustoiminta/tem_n_tukemat_energiakatselmukset/katselmus-_ja_investointituet/investointituet)

# LIITE A: LÄMPÖHÄVIÖT KYLVYN PINNALT (kuva 1)



# LIITE B: LÄMPÖHÄVIÖT ALTAAN SEINÄMISTÄ (kuva 5)

